



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

APLIKACE CAD/CAM TECHNOLOGIE PRO NÁVRH A VÝROBU PROTOTYPU TĚHLICE PŘEDNÍHO KOLA

APPLICATION OF CAD/CAM TECHNOLOGY FOR DESIGN AND
MANUFACTURE OF A PROTOTYPE OF PITMAN FRONT WHEEL

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. VÁCLAV BARDOŇ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JOSEF SEDLÁK, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Václav Bardoň

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Aplikace CAD/CAM technologie pro návrh a výrobu prototypu těhlice předního kola

v anglickém jazyce:

Application of CAD/CAM technology for design and manufacture of a prototype of pitman front wheel

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Úvod
2. Charakteristika a popis technologie frézování
3. Volba obráběného materiálu a řezných nástrojů (charakteristika, řezné podmínky)
4. Konstrukce prototypu těhlice předního kola vozu Formule Student v parametrickém programu SolidWorks a návrh aplikace obráběcích strategií v CAM programu PowerMILL
5. Výroba prototypu těhlice předního kola na obráběcím centru MCV 754 s řídicím systémem Heidenhain iTNC 530
6. Technicko-ekonomické zhodnocení
7. Závěr

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce bude návrh a výroba prototypu těhlice předního kola vozu Formule Student s využitím moderní CAD/CAM a CNC technologie. Teoretická část práce se bude zabývat charakteristikou technologie třískového obrábění (technologie frézování) a volbou obráběného materiálu včetně aplikovaných řezných nástrojů. Prototyp těhlice předního kola bude vymodelován v parametrickém programu SolidWorks. Pro vytvoření obráběcích strategií bude využit CAM program PowerMILL. Výroba prototypu těhlice bude provedena na obráběcím centru MCV 754 s řídicím systémem Heidenhain iTNC 530. Práce bude ukončena technicko-ekonomickým zhodnocením a rozбором navržené varianty výroby.

Seznam odborné literatury:

1. PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. CERM 1. vydání 246 s. 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
2. FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vydání. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
3. HEIDENHAIN: Příručka pro uživatele DIN/ISO. Programování iTNC 530. 533 188-Co-SW01.1.5/2005, Německo, Traunreut, 1. Vydání. 576 s.
4. KOCMAN, K., PROKOP, J. Technologie obrábění. 2. vydání. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
5. ŠTULPA, M. CNC obráběcí stroje. 2. dotisk 1. vydání. Praha: BEN - technická literatura, 2008. 128 s. ISBN 978-80-7300-207-7.
6. AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ, s.r.o. Příručka obrábění-kniha pro praktiky. Přel. KUDELA, M. Praha: Scientia, s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting – A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 21.11.2013

L.S.

prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a výrobou prototypu těhlice předního kola studentské formule Dragon 4 týmu TU Brno Racing s využitím moderních CAD/CAM technologií. V úvodní části se práce zabývá teoretickým rozbořem technologie frézování. Dále je proveden rozbor hliníkových slitin, který má za cíl začlenit obráběný materiál Certal. V praktické části práce je provedena konstrukce těhlice v CAD softwaru SolidWorks 2012 a návrh frézovacích strategií v CAM softwaru PowerMILL 10. Následuje realizace výroby prototypu na CNC obráběcím centru MCV 754 QUICK ve firmě BOSCH DIESEL s.r.o. v Jihlavě. Na závěr je provedeno technicko-ekonomické zhodnocení výroby.

Klíčová slova

Frézování, Certal, CAD, CAM, SolidWorks 2012, PowerMILL 10

ABSTRACT

This master's thesis deals with design and manufacture of a prototype of pitman front right wheel of student's formula Dragon 4 of a team TU Brno Racing with use of advanced CAD/CAM technology. Opening part of the thesis deals with the theoretical analysis of milling technology. Furthermore, there is an analysis of aluminum alloys, which aims to integrate the material being machined CERTAL. In the practical part of the work the construction of pitman is done using CAD software SolidWorks 2012 and proposal of milling strategies is done using software PowerMILL CAM 10. The following is the realization of manufacture in CNC machining center MCV 754 QUICK at Bosch Diesel Ltd, in Jihlava. Techno-economic evaluation of the manufacture is done in conclusion.

Key words

Milling, Certal, CAD, CAM, SolidWorks 2012, PowerMILL 10

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BARDONĚ, Václav. *Aplikace CAD/CAM technologie pro návrh a výrobu prototypu těhlice předního kola*. Brno 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 89 s. 4 přílohy. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Aplikace CAD/CAM technologie pro návrh a výrobu prototypu těhlice předního kola* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

30. 5. 2014

Datum

Bc. Václav Bardoň

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Josefu Sedlákoví, Ph.D. za vynikající vedení této práce, za jeho cenné připomínky a rady, také za jeho ochotu domluvit vykonání praktické části ve školicím centru firmy BOSCH DIESEL s.r.o. Jihlava a za jeho čas při cestování a doprovodu v této firmě. Z tohoto školicího centra bych rád poděkoval panu Jiřímu Křivánkovi za poučný a vyčerpávající výklad a za mnoho praktických rad při výrobě těhlice, taktéž děkuji panu Pavlíčkovi za příkladnou spolupráci a umožnění vykonání praktické části této diplomové práce. V neposlední řadě bych rád vyjádřil poděkování týmu TU Brno Racing za poskytnutí interních materiálů a spolupráci, zejména Bc. Marku Fejfarovi. V poslední řadě bych chtěl poděkovat své rodině za jejich podporu při mém studiu a také bych rád poděkoval mé přítelkyni za podporu a pevné nervy v době psaní této diplomové práce.

OBSAH

| | |
|--|----|
| ABSTRAKT | 4 |
| PROHLÁŠENÍ..... | 5 |
| PODĚKOVÁNÍ | 6 |
| OBSAH..... | 7 |
| ÚVOD..... | 9 |
| 1 CHARAKTERISTIKA TECHNOLOGIE FRÉZOVÁNÍ | 10 |
| 1.1 Kinematika frézování | 10 |
| 1.2 Řezné síly | 20 |
| 1.3 Řezný výkon | 23 |
| 1.4 Jednotkový čas strojní | 23 |
| 1.5 Frézovací nástroje | 25 |
| 1.6 Frézovací stroje | 30 |
| 1.6.1 Konzolové frézky | 30 |
| 1.6.2 Stolové frézky | 30 |
| 1.6.3 Rovinné frézky..... | 31 |
| 1.6.4 Speciální frézky | 31 |
| 1.6.5 CNC obráběcí centra | 31 |
| 1.7 Způsoby upínání fréz a obrobků | 32 |
| 2 ROZBOR OBRÁBĚNÉHO MATERIÁLU..... | 36 |
| 2.1 Hliník..... | 36 |
| 2.2 Slitiny hliníku | 37 |
| 2.2.1 Slitiny hliníku pro tváření..... | 38 |
| 2.2.2 Slitiny hliníku pro odlitky | 40 |
| 2.2.3 CERTAL..... | 42 |
| 2.2.4 Obrobitelnost hliníku a hliníkových slitin | 42 |
| 2.2.5 Tepelné zpracování slitin hliníku | 43 |
| 2.2.6 Označování slitin hliníku..... | 45 |
| 3 KONSTRUKCE PROTOTYPU TĚHLICE PŘEDNÍHO PRAVÉHO KOLA A NÁVRH FRÉZOVACÍCH STRATEGIÍ..... | 48 |
| 3.1 Konstrukce těhlice předního pravého kola v CAD softwaru SolidWorks | 49 |
| 3.2 Simulace zatěžování | 62 |
| 3.2.1 Stav brzdění a průjezd zatáčkou | 62 |
| 3.2.2 Jízda po dvou kolech | 63 |
| 3.3 Návrh frézovacích strategií v CAM softwaru PowerMILL 10..... | 64 |

| | | |
|-----|---|----|
| 4 | VÝROBA TĚHLICE PRAVÉHO PŘEDNÍHO KOLA..... | 74 |
| 4.1 | Popis CNC obráběcího centra MCV 754 QUICK | 74 |
| 4.2 | Popis výroby těhlice předního kola..... | 75 |
| 5 | TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ | 79 |
| 5.1 | Porovnání a vyhodnocení strojních časů | 79 |
| 5.2 | Vyhodnocení nákladů na výrobu prototypu těhlice | 80 |
| | ZÁVĚR..... | 82 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ | 83 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK..... | 87 |
| | SEZNAM PŘÍLOH | 90 |

ÚVOD

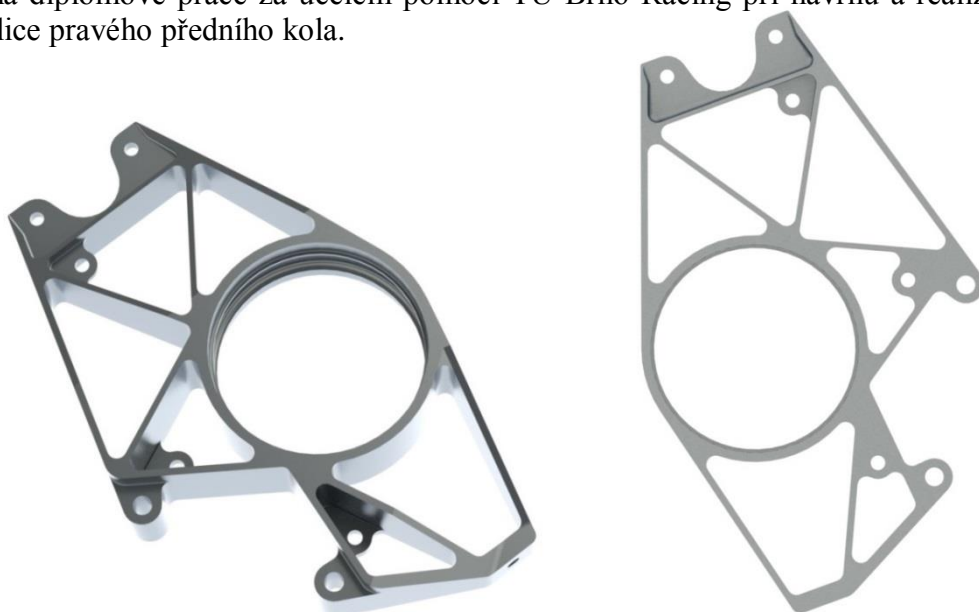
Hlavním cílem této diplomové práce je výroba těhlice pravého předního kola student formule, se kterou souvisí návrh výrobní technologie a zpracování výrobních podkladů, jakými jsou výkres a výrobní postup, dále volba frézovacích nástrojů a obráběného materiálu. Při zpracovávání této práce bylo využito počítačové podpory ve formě moderní CAD/CAM technologie, jenž byla využívána po celou dobu od samotného návrhu součásti až po její finální realizaci.

Téma práce bylo zvoleno na základě pomoci týmu TU Brno Racing při výrobě těhlice pravého předního kola na projektu studentské formule a dále dle mé osobní touhy ponořit se hlouběji do problematiky frézovacího procesu a porozumět tak všem souvislostem, které ho ovlivňují.

Tým TU Brno Racing je složen z řad studentů převážně z Ústavu automobilního a dopravního inženýrství na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně, ale také z ostatních univerzitních ústavů a fakult. Odborná podpora a konzultace je pod záštitou studentů z doktorandského programu i od vedoucích pracovníků ústavu či externích odborníků z automobilové praxe. Cílem tohoto projektu je už čtvrtá řada formule Dragon 4. Formule musí splňovat požadavky na bezpečnost, spolehlivost, dobrou ovladatelnost a manévrovatelnost. Dále je kladen velký důraz na ekologičnost, ekonomičnost a estetičnost vozu. Jakmile je formule hotova, prochází celou škálou testů a zkoušek a poté je nasazena na mezinárodních soutěžích a závodech, kde tým TU Brno Racing poměřuje svoje schopnosti do vozu vložené s ostatními týmy z univerzit z celé Evropy [3, 4].

VUT FSI je reprezentována týmem TU Brno Racing tímto vozem studentské formule v soutěži Formula Student třídy 1. Podmínkou pro účast v této třídě soutěže je konstrukce závodního vozu (počínaje návrhem až po fyzickou realizaci) v časovém horizontu jednoho kalendářního roku. V rámci soutěže je vůz podroben všem soutěžním disciplínám, bodově ohodnocen a na základě celkového součtu bodů umístěn na pozici v žebříčku [4, 5].

Poněvadž závodní vůz obsahuje mnoho součástek, taktéž kvůli časové tíži a ušetření nákladů, byla navázána spolupráce s Ústavem strojírenské technologie, který vypsál toto téma diplomové práce za účelem pomoci TU Brno Racing při návrhu a realizaci výroby těhlice pravého předního kola.



1 CHARAKTERISTIKA TECHNOLOGIE FRÉZOVÁNÍ

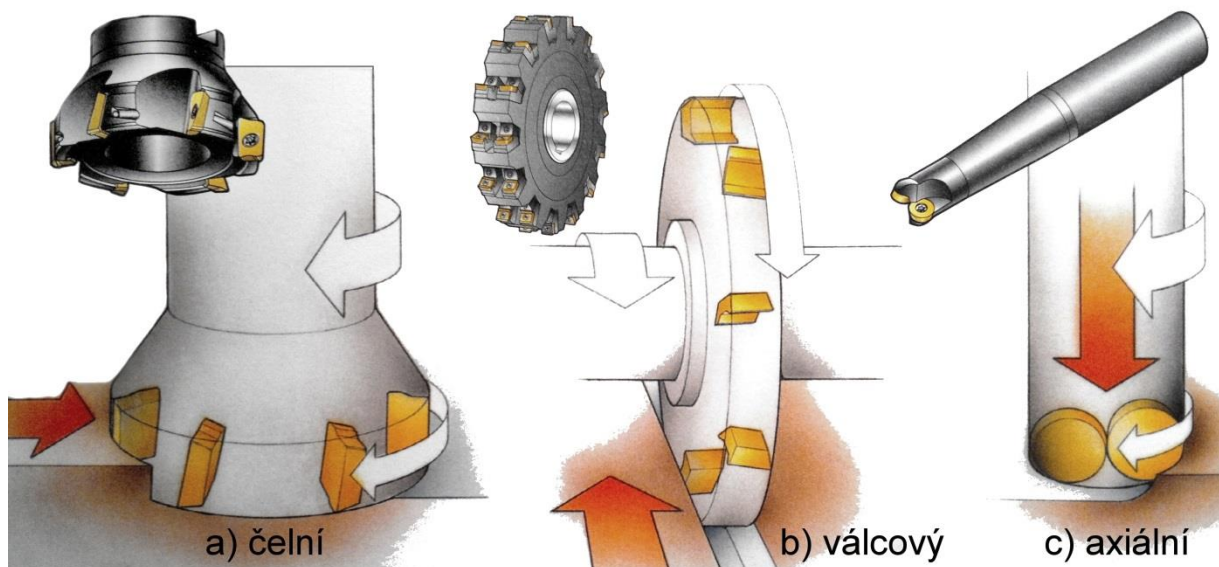
Počátky frézování spadají do období kolem průmyslové revoluce, kdy v důsledku zbrojení na americkém kontinentě byla potřeba hromadné výroby zbraní. Největší rozmach započal ale až ve 20. století s příchodem pohonu parním strojem, později elektromotorem, které ukončily dříve používaný ruční pohon. Současné frézování probíhá na moderních víceosých CNC obráběcích centrech. Jejich výhody se projevují vysokým výkonem obrábění v důsledku moderních řezných materiálů a povlaků společně s moderními řídicími systémy umožňující vysokou produktivitu, vynikající jakost obrobené plochy, vysokou přesnost rozměrů, tolerancí a také flexibilitu při výrobě tvarově složitých součástí. To vše předurčuje frézování směrem k vývoji v čím dál tím více univerzálnější metodu obrábění (např. výroba lopatek, ozubených kol, atd.) [1, 2].

1.1 Kinematika frézování

Frézování, jakožto jedna z obráběcích technologií, je proces, při němž hlavní řezný pohyb je uskutečňován rotačním pohybem nástroje nazývaným fréza a vedlejším posuvným pohybem (eventuálně otáčením) obrobku dochází k třískovému odebrání materiálu. Fréza je zpravidla vícebřitá, nikdy nejsou v záběru všechny břity (zuby) a řezný proces není kontinuální jako u soustružení, ale přerušovaný, kdy každý zub vytváří krátké třísky nestejné tloušťky. U dnešní frézovacích center není posuvový pohyb realizován už pouze v rovinném směru, ale je možno ho plynule měnit, eventuálně natáčet, např. 5-ti osá obráběcí centra.

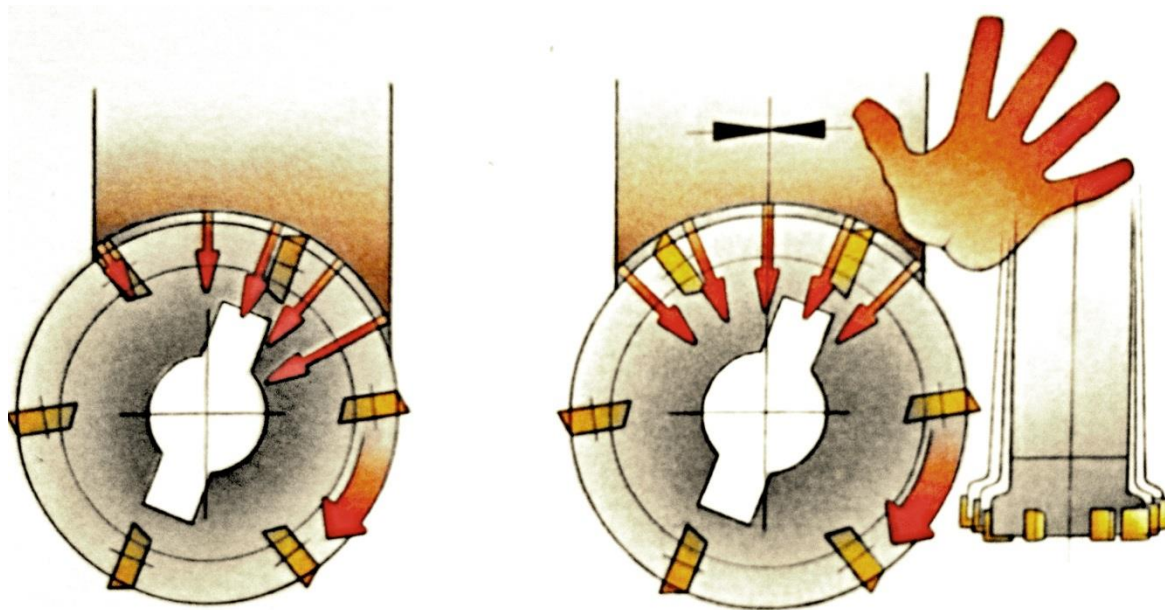
Frézování využívá vždy některý z těchto typů řezů (viz obr. 1):

- a) čelní (radiální),
- b) válcový (obvodový),
- c) axiální.



Obr. 1 Typy frézovacího procesu [6].

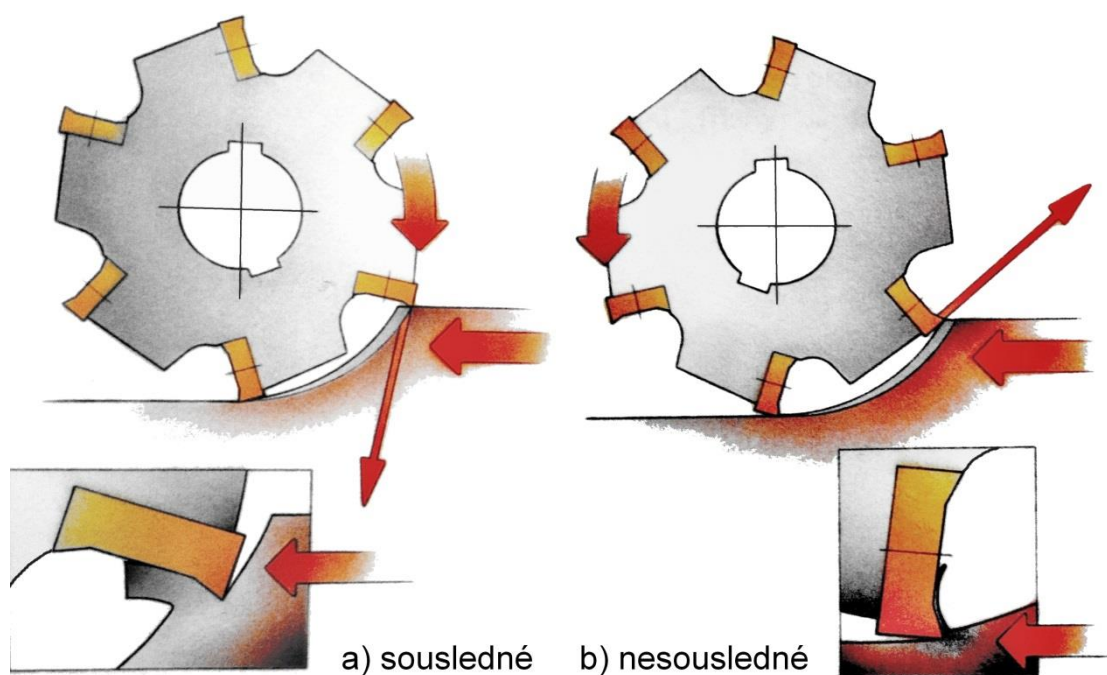
Čelní frézování (viz obr. 1a) je kombinovaný řez, který je prováděn dvěma břity každé vyměnitelné břitové destičky (dále jen VBD). Obvodové břity VBD konají hlavní řezný proces, při kterém odebírají materiál, a vedlejší břity VBD, které jsou umístěny na čele frézy, se podílejí na tvorbě povrchu obrobku s typickou letokruhovou texturou. Fréza rotuje v rovině kolmé na rovinu ve směru radiálního posuvu vůči povrchu obrobku. Hloubka řezu je měřena v axiálním směru, což je spjato s tím, jak hluboko hlavní břit VBD odebírá materiál. U tohoto typu frézování je důležitý správný výběr průměru frézy související s šířkou obráběného materiálu a výkonem stroje. Průměr frézy by neměl být stejný jako šířka obrobku, jelikož se tak dosáhne lepšího utváření třísky a správného zatížení VBD, proto je doporučováno volit průměr frézy o 20 až 50 % větší. V případě vícero průchodů se doporučuje volit průměr frézy k šířce obrobku v poměru 4/3. Dále je u čelního frézování dle polohy osy nástroje vzhledem k obráběnému materiálu rozlišováno frézování *symetrické* a *nesymetrické* (viz obr. 2). To má důležitý vliv na vznik vibrací. V případě umístění nástroje symetricky vůči ose obráběného materiálu (obr. 2 vpravo) dochází k fluktuacím řezných sil tím, jak břity VBD na jedné straně vjíždějí do a odjíždějí z materiálu, hrozí jejich vylamování, poškození vřetena frézky a také zhoršení kvality obráběné plochy. Ideální situace umístění frézy je co možná nejbližší středu, ale ne přesně na střed, což s sebou nese výhody menšího rázového zatížení stroje, lepšího utváření třísek a také řezy jednotlivých VBD jsou v tomto místě nejkratší. Obvyklé použití tohoto typu frézování je frézování rovinných ploch, při výrobě osazení a podobně [1, 6].



Obr. 2 Nesymetrické (vlevo) a symetrické (vpravo) frézování [6].

Válcové frézování (viz obr. 1b) je charakteristické umístěním VBD po obvodu nástroje podobně jako v případě a), ale nekonají kombinovaný řez, nýbrž odebírají materiál obrobku pouze jedním břitem. Obrobená plocha je rovnoběžná s osou rotace válcové frézy ve směru tangenciálního posuvu. Hloubka řezu je v tomto případě definována tím, jak hluboko proniká průměr válcové frézy do obrobku. Typický případ využití válcové frézy je při frézování drážek apod. Dle kinematiky obráběcího procesu lze válcové frézování dále dělit na sousledné (viz obr. 3a) a nesousledné frézování (viz obr. 3b). *Sousledné frézování* je myšleno tehdy, je-li směr posuvu obrobku stejný jako smysl otáčení frézy. Tloušťka třísky je na počátku záběru VBD největší a směrem k výjezdu z obrobku se tato tloušťka

zmenšuje až na nulovou hodnotu, což způsobuje rázové namáhání VBD. Nevzniká kluzný efekt a taktéž dochází k menšímu vývinu tepla, než je tomu u nesousledného frézování. Krom tohoto dochází také k minimálnímu zpevňování materiálu. Někdy dochází k nalepení nebo navaření třísek na břit VBD a ty jsou při další otáčce frézy vneseny do dalšího záběru, což u sousledného frézování nevadí, jelikož je tříska přeříznuta na dvě části a nedojde k poškození břitu. Řezné síly mají za následek přitlačování obrobku směrem ke stolu frézky a vtahování obrobku ve směru posuvu, přičemž mají tendenci udržovat VBD stále v řezu, což klade určité požadavky na frézovací proces, proto je zapotřebí, aby posuvový mechanismus stolu frézky byl bez vůle, jinak by docházelo ke zvýšení posuvu, což by mělo za následek zvětšení tloušťky třísky a zničení břitu. To klade důraz na použití kuličkových posuvových šroubů, jimiž jsou moderní frézky vybaveny. Z tohoto plyne, že sousledné frézování je ve strojírenské praxi užíváno tam, kde to stroj, nástroj a obrobek při frézovacím procesu umožní a jako takové je užíváno častěji. Naproti tomu *nesousledné frézování* je myšleno tehdy, je-li smysl směru posuvu stolu v místě styku VBD s obrobkem opačný, než smysl otáčení frézy (jdou proti sobě). Tloušťka třísky vzniká z nulové hodnoty až do své maximální hodnoty v místě výjezdu břitové destičky z obrobku. Někdy může být vznikající tříska vtažena mezi břit a obrobek, což může způsobit vylomení VBD, opačně je tomu u sousledného frézování, kde by stejná tříska byla odražena z břitu a nemohla by obrobek poškodit. Řezné síly mají tendenci zvedat obrobek směrem vzhůru od stolu, což vyžaduje velmi stabilní systém upínání. Břit je odtlačován ze záběru, přičemž během záběru dochází ke zpevnění povrchové vrstvy obráběného materiálu, ale vlivem tření a vysokých teplot je břit VBD více opotřebováván, což může vést k tvorbě nárůstků a snížení trvanlivosti břitu, než je tomu u sousledného frézování. Nesousledné frézování se používá tam, kde nelze aplikovat sousledné frézování. Např. při velkých rozdílech přídavek na obrábění, dále při frézování frézky, které nejsou vybaveny kuličkovými posuvovými šrouby, dále při frézování hlubokých drážek a také při dokončovacím frézování, kde kluzný efekt umožní zvýšení kvality obrobené plochy [1, 6].



Obr. 3 Sousledné a nesousledné frézování válcovou frézou [6].

Axiální frézování (viz obr. 1c) někdy nazývané také jako ponorné frézování využívá břitů na čele nebo konci nástroje, jenž se pohybuje směrem v axiálním směru, kdy dochází částečně také k vrtání do obrobku. Důležitá věc pro frézu pracující axiálním posuvem je nutnost umístění minimálně jednoho břitu nad středem nástroje, který umožní obrábět i v axiálním posuvu. Tohoto řezného procesu je hojně využíváno při frézování úzkých vybrání, uzavřených drážek, kdy fréza nejprve vrtá a až dosáhne určité hloubky, teprve pak se pohybuje radiálním posuvem, čímž se vytváří samotná drážka. V případě frézování tvarových ploch je možno využít kombinovaného směru posuvu [1, 6].

Mezi nejdůležitější veličiny určující kinematické parametry frézovacího procesu se řadí *řezná rychlost* v_c týkající se hlavního řezného pohybu konaného frézou a *posuvová rychlost* v_f týkající se vedlejšího pohybu konaného posuvem obrobku. Uvedené veličiny v_c a v_f jsou dány vztahy (1.1) a (1.2) [1, 2, 6, 7].

$$v_c = \frac{\pi \cdot D_c \cdot n}{1000} \quad [m \cdot min^{-1}] \quad (1.1)$$

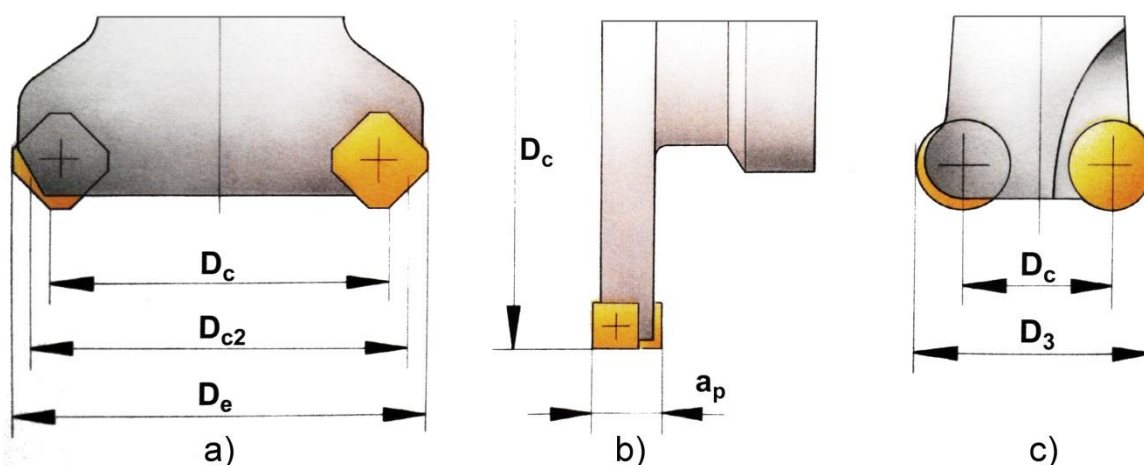
$$v_f = f_z \cdot n \cdot z_n \quad [mm \cdot min^{-1}] \quad (1.2)$$

| | | | | |
|------|-------|-----------------------|---|--|
| kde: | v_c | $[m \cdot min^{-1}]$ | - | řezná rychlost, |
| | v_f | $[mm \cdot min^{-1}]$ | - | posuvová rychlost (posuv stolu), |
| | D_c | $[mm]$ | - | průměr frézy (taktéž průměr řezu), |
| | n | $[min^{-1}]$ | - | otáčky vřetene, |
| | f_z | $[mm]$ | - | posuv na zub (VBD) pro zvolenou frézu a geometrii, |
| | z_n | $[ks]$ | - | celkový počet břitů (zubů, VBD) na fréze. |

Otáčky vřetene $n [min^{-1}]$ je počet otáček vykonaných nástrojem za jednu minutu. Souvisí přímo s obráběcím strojem a dají se vypočítat z doporučené hodnoty řezné rychlosti v_c pro konkrétní operaci podle vztahu (1.3) [1, 6].

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D_c} \quad [min^{-1}] \quad (1.3)$$

D_c (obr. 4) je *průměr frézy* (také označován jako specifický průměr nástroje), který určuje dynamiku rotujícího frézovacího nástroje. Je to ta část frézy, která určuje výsledný průměr řezu. Kromě tohoto průměru se občas vyskytují ještě pojmy *největší průměr frézy* označený D_{c2} nebo D_3 nebo *efektivní průměr* označený D_e , jenž je u čelního frézování základem pro výpočet řezné rychlosti [6].



Obr. 4 Specifické průměry pro frézy a) čelní b) válcové c) axiální [6].

Posuv na zub f_z (obr. 5 a obr. 6) je hodnota určující posuv stolu, aby bylo možné zajistit co možná nejlepší obráběcí podmínky, proto je důležitým faktorem rozhodujícím o objemu odebraného materiálu jedním břitem zubu, pro jeho zatížení, trvanlivost a stav plochy jím obrobené. Jedná se o lineární vzdálenost, jež nástroj urazí během záběru jednoho daného zubu (VBD). Posuv na zub je také roven dráze posuvu stolu, kterou musí stůl urazit mezi dvěma za sebou jdoucími záběry zubů. Posuv na zub lze tedy spočítat pomocí vztahu (1.4), kde je posuv stolu vztažen na otáčky a počet zubů [1, 6].

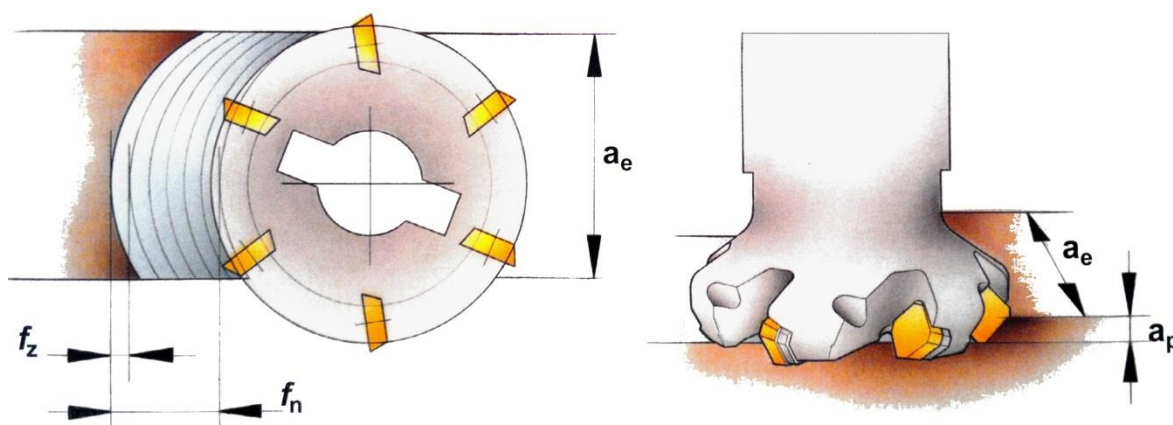
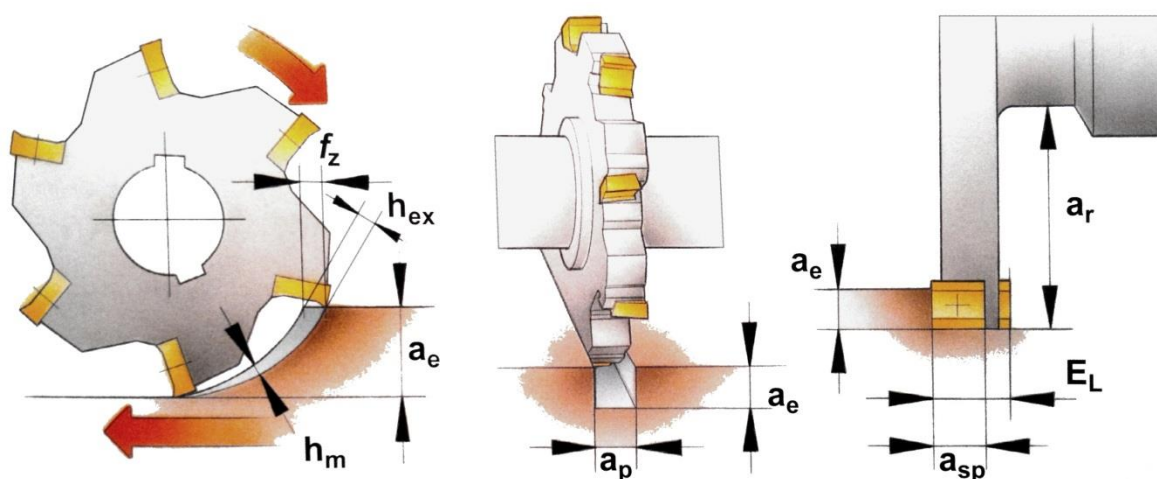
$$f_z = \frac{v_f}{n \cdot z_n} \quad [mm] \quad (1.4)$$

Mimo posuvu na zub existuje také veličina *posuv na otáčku* f_n definována vztahem (1.5), jenž je používána k posouzení vhodnosti nástroje k dokončovací operaci. Tato veličina je spíše informativní veličinou definující o kolik se fréza posune během jedno pootočení [6].

$$f_n = \frac{v_f}{n} \quad [mm/ot] \quad (1.5)$$

z_n je počet zubů, jimiž je frézovací nástroj osazen. O jejich množství rozhoduje materiál, šířka součásti, požadavky na kvalitu povrchu, výkon stroje a stabilita [6].

Dalšími neméně důležitými parametry zasahujícími do procesu frézování jsou axiální hloubka řezu a_p [mm], šířka řezu a_e [mm] a maximální tloušťka třísky h_{ex} (viz obr. 5 pro čelní frézování a obr. 6 pro válcové frézování) [6].

Obr. 5 Grafické zobrazení f_z , f_n , a_e , a_p pro čelní frézování [6].Obr. 6 Grafické zobrazení f_z , h_{ex} , h_m , a_p , a_e pro válcové frézování [6].

Axiální hloubka řezu a_p [mm] je hloubka řezu, kterou nástroj odebere z jedné plochy obrobku. V podstatě se jedná o vzdálenost, o jakou je třeba nastavit frézu pod neobrobenou plochu. Pro čelní frézování se jedná o axiální vzdálenost (viz obr. 5) a pro válcové frézování se jedná o radiální vzdálenost (viz obr. 6). Hloubka řezu se nemalou měrou podílí na velikosti objemu odebíraného materiálu při frézování, kde hraje důležitou roli při posuzování výkonu frézovacího procesu [1, 6].

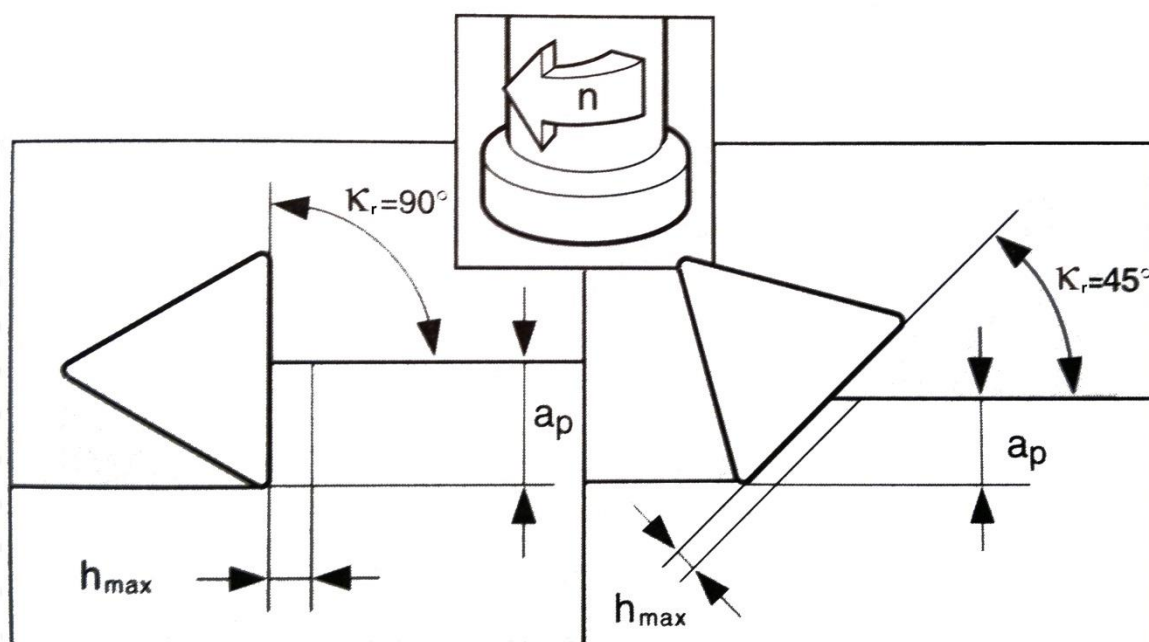
Šířka frézované plochy (resp. radiální hloubka řezu) a_e [mm] je vzdálenost, o jakou proniká fréza do obráběného materiálu (tj. v případě rovinného frézování válcovou frézou na obr. 6) nebo šířku, v jaké je průměr frézy v záběru (tj. v případě rovinného frézování čelní frézou obr. 5) [1, 6].

Maximální tloušťka třísky h_{ex} (někdy značena h_{max}) [mm] je důležitá z hlediska břitů nástroje VBD. Je rovna vzdálenosti stolu frézky, kterou vykoná mezi dvěma po sobě jdoucími záběry břitů. Je to v podstatě maximální tloušťka materiálu, kterou v radiálním směru musí břit ubrat na jeden záběr, toto se musí zohlednit při posouzení maximálního namáhání břitů. Maximální tloušťka třísky se mění v závislosti, jaký má VBD frézy úhel nastavení hlavního ostří κ_r . Důležitý je hlavně při rovinném frézování čelní frézou. Tento úhel je vymezen obráběnou plochou a pracovní rovinou hlavního ostří břitů každé VBD, přičemž extrémní hodnoty tohoto úhlu jsou $\kappa_r = 90^\circ$ a $\kappa_r = 45^\circ$ (viz obr. 11). Platí, že při stejné hloubce řezu a_p způsobuje větší úhel κ_r třísku kratší a větší tloušťky, zatímco menší

úhel κ_r způsobí vznik třísky delší o menší tloušťce zabírající větší délku břitu (namáhání jednotlivých břítů VBD je v tomto případě menší, umožňující zvýšení posuvu na zub f_z , ale na druhou stranu fréza může obrábět při menších hloubkách řezu a_p např. při rovinném frézování čelní frézou viz obr. 7). Každý břit VBD je navržen a testován pro určitou minimální a maximální hodnotu tloušťky třísky. Velikost maximální tloušťky třísky h_{max} se spočte dle vztahu (1.6) [1, 6]:

$$h_{max} = \sin \kappa_r \cdot f_z \quad [mm] \quad (1.6)$$

kde: $\kappa_r [^\circ]$ - úhel nastavení hlavní ostří,
 $f_z [mm]$ - posuv na zub.



Obr. 7 Vliv úhlu nastavení hlavního ostří κ_r na změnu tloušťky třísky h_{max} a hloubky řezu a_p při rovinném frézování čelní frézou [1].

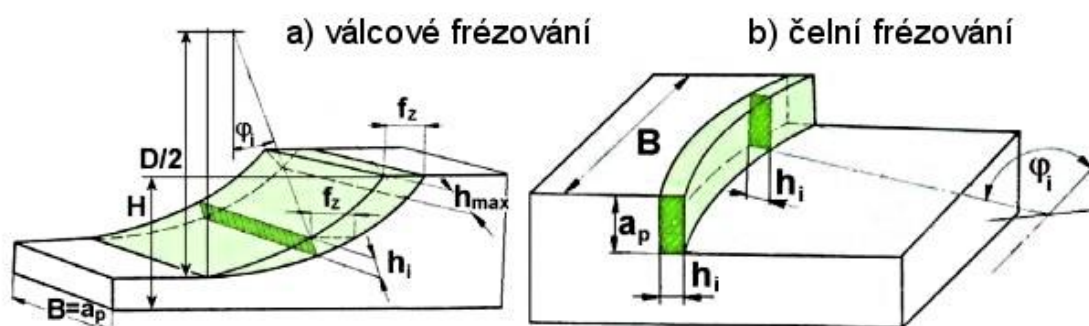
S maximální tloušťkou třísky souvisí i výpočet *jmenovitého průřezu třísky* A_{Di} (vztah 1.9 platí, jak pro čelní frézování viz obr. 8b, tak pro válcové frézování viz obr. 8a), který je dán násobkem *jmenovité tloušťky třísky* h_{Di} (vztah 1.7) a *jmenovité šířky třísky* b_{Di} (vztah 1.8). Tloušťka třísky není v průběhu frézování konstantní hodnotou, ale mění se v závislosti na *úhlu posuvového pohybu* φ_i (někdy označován jako úhel styku frézy s obrobkem), který není závislý pouze na poloze řezné VBD, ale u fréz se šikmými zuby ve šroubovici se jeho velikost může měnit také podél daného ostří [2, 7, 8].

$$h_{Di} = f_z \cdot \sin \kappa_r \cdot \sin \varphi_i \quad [mm], \quad (1.7)$$

$$b_{Di} = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad [mm], \quad (1.8)$$

$$A_{Di} = h_{Di} \cdot b_{Di} = f_z \cdot a_p \cdot \sin \varphi_i \quad [mm^2], \quad (1.9)$$

| | | | | |
|------|-------------|--------------------|---|--------------------------------|
| kde: | h_{Di} | [mm] | - | jmenovitá tloušťka třísky, |
| | b_{Di} | [mm] | - | jmenovitá šířka třísky, |
| | A_{Di} | [mm ²] | - | jmenovitý průřez třísky, |
| | f_z | [mm] | - | posuv na zub, |
| | a_p | [mm] | - | hloubka řezu, |
| | κ_r | [°] | - | úhel nastavení hlavního ostří, |
| | φ_i | [°] | - | úhel posuvového pohybu. |



Obr. 8 Zobrazení jmenovitého průřezu třísky pro frézování a) válcové b) čelní [8].

Střední (průměrná) tloušťka třísky h_m [mm] je klíčovou veličinou při frézování válcovou frézou, kde souvisí se šířkou frézované plochy a_e a průměrem frézy D_c . Pro rovinné frézování válcovou frézou (výpočet dle vztahu 1.10) by se měla hodnota h_m pohybovat v rozmezí 0,04 až 0,1 mm a pro rovinné frézování čelní frézou (výpočet dle vztahu 1.11) je dolní hodnotou 0,1 mm, ale ta závisí na faktorech, jakými jsou geometrie břitu nebo tvrdost obráběného materiálu. U rovinného frézování čelní frézou v mnoha případech postačuje rovná-li se hodnota posuvu na zub f_z hodnotě střední tloušťky třísky h_m . Jediná výjimka platí v případě úhlu nastavení hlavního ostří $\kappa_r = 45^\circ$, kdy by vypočtená hodnota h_m měla být vynásobena korekčním faktorem o velikosti 0,71. Malá hodnota posuvu na zub f_z má na frézovací proces stejný dopad, jako je špatné využití možností VBD a výkonu frézovacího stroje. Výsledkem výpočtu h_m dle uvedených vztahů by mělo být dosažení minimální hodnoty střední tloušťky třísky. Doporučené hodnoty střední tloušťky třísky h_m v závislosti na poměru a_e/D_c a posuvu na zub f_z pro rovinné frézování válcovou frézou jsou vypsány v tab. 1. Střední tloušťka třísky má také význam při určování velikosti měrné řezné síly k_c a následně s ní souvisejícím výpočtem výkonu [1, 6].

$$h_m = f_z \cdot \sqrt{\frac{a_e}{D_c}} \quad [mm], \quad (1.10)$$

$$h_m = \frac{\sin \kappa_r \cdot 180 \cdot a_e \cdot f_z}{\pi \cdot D_c \cdot \arcsin\left(\frac{a_e}{D_c}\right)} \quad [mm], \quad (1.11)$$

kde: f_z [mm] - posuv na zub,
 a_e [mm] - šířka řezu,
 D_c [mm] - průměr frézy,
 κ_r [°] - úhel nastavení hlavního ostří.

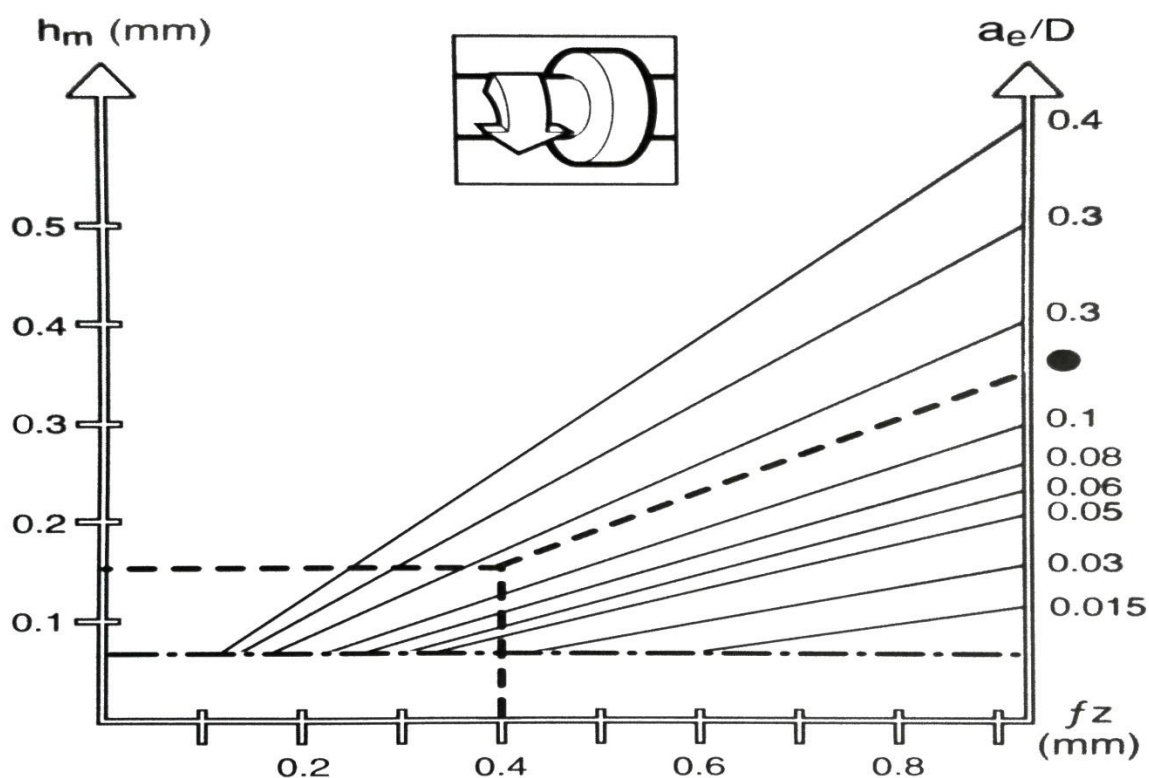
Tab. 1 Doporučené hodnoty pro h_m v závislosti mezi poměrem a_e/D_c a posuvem na zub f_z [1].

| a_e/D_c | f_z [mm] | | | | | | | | | | |
|-----------|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0,04 | 0,08 | 0,1 | 0,16 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,8 | 1 |
| | h_m [mm] | | | | | | | | | | |
| 1/50 | - | - | - | - | 0,03 | 0,04 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,11 | 0,14 |
| 1/40 | - | - | - | 0,03 | 0,03 | 0,05 | 0,06 | 0,08 | 0,09 | 0,13 | 0,16 |
| 1/25 | - | - | - | 0,03 | 0,04 | 0,06 | 0,08 | 0,1 | 0,12 | 0,16 | 0,2 |
| 1/20 | - | - | - | 0,03 | 0,04 | 0,07 | 0,09 | 0,11 | 0,13 | 0,18 | 0,22 |
| 1/10 | - | - | 0,03 | 0,05 | 0,06 | 0,09 | 0,12 | 0,16 | 0,19 | 0,25 | - |
| 2/10 | - | 0,03 | 0,04 | 0,07 | 0,09 | 0,13 | 0,17 | 0,22 | 0,26 | - | - |
| 3/10 | - | 0,04 | 0,05 | 0,08 | 0,1 | 0,16 | 0,21 | 0,26 | - | - | - |
| 4/10 | - | 0,05 | 0,06 | 0,09 | 0,12 | 0,18 | 0,23 | - | - | - | - |
| 5/10 | 0,03 | 0,05 | 0,06 | 0,1 | 0,13 | 0,19 | 0,25 | - | - | - | - |

Vzájemnou závislost mezi poměrem šířky řezu k průměru frézy a_e/D_c a posuvem na zub f_z pro doporučené hodnoty střední tloušťky třísky h_m (vyjádřené v tab. 1) lze obdobně graficky vyjádřit tak, jak je znázorněno na obr. 9, kde je pro názornou ukázkou vysvětleno, jak lze pomocí tohoto obrázku přibližně určit doporučenou hodnotu h_m . Pro zvolený poměr a_e/D_c rovno 2/10 a posuv na zub f_z rovno 0,4 mm vychází hodnota h_m rovna cca 0,17 mm. Při frézování čelní frézou nebývá střední tloušťka třísky h_m kritickou hodnotou v případech, kdy je použito doporučených posuvů na zub f_z , ale leží-li osa frézy mimo frézovanou plochu obrobku, měla by být provedena její kontrola. Platí, že čím je úhel posuvového pohybu φ_i mezi frézou a obrobkem menší, tím je osa frézy vzdálenější od místa obrábění a tím tenčí bude vzniklá tříska. To jsou zpravidla případy při frézování kotoučovou nebo čelní frézou, popř. při frézování frézou do rohu, kdy je fréza v záběru ze strany obrobku, takže je v těchto případech střední tloušťka třísky vždy menší, než posuv na zub. Na střední tloušťku třísky h_m a posuv na zub f_z při frézování čelní frézou nebo při obvodovém frézování se nemalou měrou podílí taktéž i úhel nastavení hlavního ostří κ_r , kde platí vztah 1.12 a s ním související tab. 2. udávající hodnoty koeficient x_κ úhlu nastavení hlavního ostří pro frézování čelní a válcovou frézou [1].

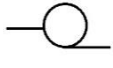
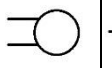
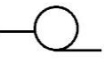
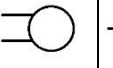
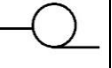
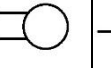
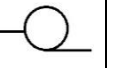
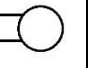
$$f_z = \frac{h_m}{x_\kappa} \quad [\text{mm}], \quad (1.12)$$

kde: h_m [mm] - střední tloušťka třísky,
 x_κ [-] - koeficient úhlu nastavení hlavního ostří.



Obr. 9 Grafická závislost a_e/D_c a f_z pro doporučené hodnoty střední tloušťky třísky h_m [1].

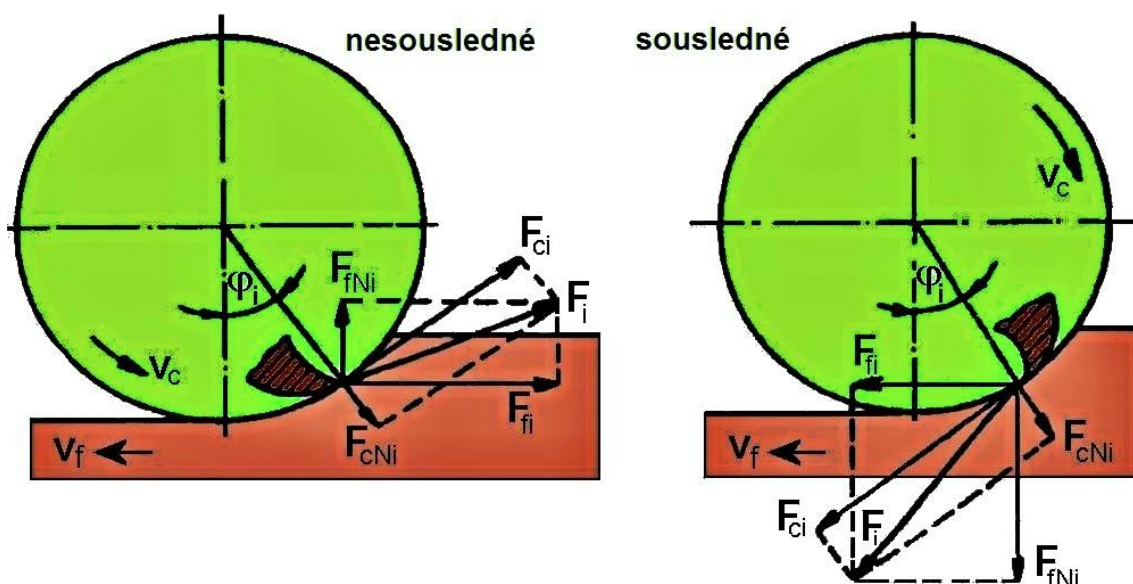
Tab. 2 Hodnoty koeficientu úhlu nastavení hl. ostří x_k pro závislost konkrétních úhlů nastavení hlavního ostří κ_r a poměru šířky řezu a_e k průměru frézy D_c pro válcovou a čelní frézu [1].

| a_e/D_c | X_k | | | | | | | |
|-----------|---|---|---|---|--|---|---|---|
| | $\kappa_r = 90^\circ$ | | $\kappa_r = 75^\circ$ | | $\kappa_r = 60^\circ$ | | $\kappa_r = 45^\circ$ | |
| |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,025 | 0,16 | 1 | 0,15 | 0,97 | 0,14 | 0,87 | 0,11 | 0,71 |
| 0,05 | 0,22 | 1 | 0,21 | 0,97 | 0,19 | 0,87 | 0,16 | 0,71 |
| 0,075 | 0,27 | 1 | 0,26 | 0,97 | 0,23 | 0,87 | 0,19 | 0,71 |
| 0,1 | 0,31 | 1 | 0,3 | 0,96 | 0,27 | 0,86 | 0,22 | 0,71 |
| 0,15 | 0,38 | 1 | 0,36 | 0,96 | 0,33 | 0,86 | 0,27 | 0,7 |
| 0,2 | 0,43 | 0,99 | 0,42 | 0,96 | 0,37 | 0,86 | 0,31 | 0,7 |
| 0,25 | 0,48 | 0,99 | 0,46 | 0,96 | 0,42 | 0,86 | 0,34 | 0,7 |
| 0,3 | 0,52 | 0,98 | 0,5 | 0,95 | 0,45 | 0,85 | 0,37 | 0,7 |
| 0,35 | 0,55 | 0,98 | 0,53 | 0,95 | 0,48 | 0,85 | 0,39 | 0,69 |
| 0,4 | 0,58 | 0,97 | 0,56 | 0,94 | 0,51 | 0,84 | 0,41 | 0,69 |
| 0,45 | 0,61 | 0,96 | 0,59 | 0,93 | 0,53 | 0,83 | 0,43 | 0,68 |
| 0,5 | 0,64 | 0,95 | 0,61 | 0,92 | 0,55 | 0,83 | 0,45 | 0,68 |
| 0,6 | 0,68 | 0,93 | 0,65 | 0,9 | 0,59 | 0,81 | 0,48 | 0,66 |
| 0,7 | 0,71 | 0,9 | 0,68 | 0,87 | 0,61 | 0,78 | 0,5 | 0,64 |
| 0,8 | 0,72 | 0,86 | 0,7 | 0,83 | 0,63 | 0,75 | 0,51 | 0,61 |
| 0,9 | 0,72 | 0,8 | 0,7 | 0,78 | 0,62 | 0,7 | 0,51 | 0,57 |
| 1 | 0,64 | 0,64 | 0,61 | 0,61 | 0,55 | 0,55 | 0,45 | 0,45 |

1.2 Řezné síly

Řezné síly při frézovacím procesu závisí na mnoha faktorech, jimiž jsou postup způsobu frézování, poloha nástroje vůči obrobku, geometrie VBD, tloušťka třísky, typ a velikost opotřebení břitu VBD a také řezné podmínky (řezná rychlost, otáčky, průměr frézy) [1].

Při určování řezných sil se vychází z předpokladu rozložení složek sil pro jeden břit, jehož poloha je vymezena úhlem posuvového pohybu φ_i . Pro frézování válcovou frézou s přímými břity je celková řezná síla F_c (F_i) rozložena na složku F_{ci} a F_{cNi} , respektive na složky F_{fi} a F_{fNi} (viz obr. 10). Poněvadž při frézování není v záběru pouze jeden břit, je celková řezná síla určena jako suma dílčích složek celkové řezné síly F_{ci} od všech břitů v záběru, které jsou navíc určeny svou okamžitou polohou vzhledem k obrobku. Pro válcové frézování se celková řezná síla spočte dle vztahu 1.13 a pro čelní frézování do vztahu 1.13 vstupuje navíc ještě vliv úhlu nastavení hlavního ostří κ_r , pak se vztah 1.13 změní do podoby, která je dána vztahem 1.14 [2, 8].



Obr. 10 Rozložení a směr řezných sil při válcovém frézování nesousledném a sousledném [8].

Význam jednotlivých složek celkové řezné síly F_c (F_i) [2, 8]: F_{fNi} – kolmá posuvová síla,
 F_{fi} – posuvová síla,
 F_{cNi} – kolmá řezná síla,
 F_{ci} – řezná síla.

Zatímco F_{ci} a F_i mají vliv na příkon frézky, síla F_{fi} je v interakci s posuvem stolu a síla F_{cNi} v interakci s upnutím obrobku [1].

$$F_c = \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} = c_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \varphi_i \quad [N], \quad (1.13)$$

$$F_c = \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} = c_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^{x-1} \kappa_r \cdot \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \varphi_i \quad [N], \quad (1.14)$$

| | | | |
|------|-----------------|---|--|
| kde: | c_{Fc} [-] | - | konstanta vlivu obráběného materiálu, |
| | a_p [mm] | - | hloubka řezu, |
| | f_z [mm] | - | posuv na zub pro zvolenou frézu a geometrii, |
| | x [-] | - | exponent vlivu tloušťky třísky, |
| | κ_r [°] | - | úhel nastavení hlavního ostří, |
| | n_z [-] | - | počet zubů v současném záběru, |
| | φ_i [°] | - | úhel posuvového pohybu. |

Počet zubů v současném záběru n_z pro frézování válcovou frézou lze stanovit dle vztahu 1.15 [2, 8],

$$n_z = \frac{\varphi_{max}}{360} \cdot z \quad [-], \quad (1.15)$$

| | | | |
|------|---------------------|---|-----------------------------------|
| kde: | φ_{max} [°] | - | maximální úhel posuvového pohybu, |
| | z [-] | - | počet zubů (VBD) frézy, |

a pro frézování čelní frézou dle vztahu 1.16 [2, 8],

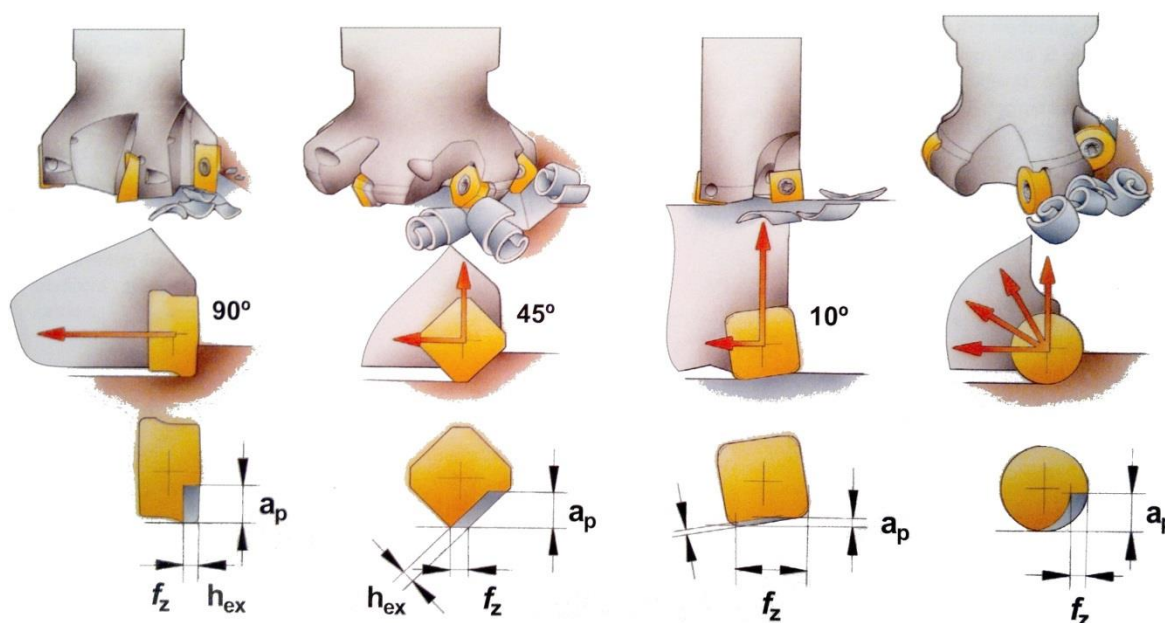
$$n_z = \frac{\psi}{360} \cdot z \quad [-], \quad (1.16)$$

| | | | |
|------|------------|---|--------------------------|
| kde: | ψ [°] | - | úhel záběru čelní frézy, |
| | z [-] | - | počet zubů (VBD) frézy. |

Na směr a velikost řezných sil mají také značný vliv např. způsob frézování, volba materiálu obrobku, geometrie VBD, tloušťka třísky, poloha nástroje a délka jeho vyložení, míra opotřebení VBD a nemalou měrou také volba řezných podmínek. Během rotace nástroje se směr působení sil mění. Taktéž hloubka řezu a_p se podílí na směru řezné síly F_c . Např. při sousledném frézování válcovou frézou při malém počtu VBD v záběru a malé hloubce řezu se směr síly F_c téměř ztotožní se směrem posuvu stolu, při velké hloubce řezu se naopak vychyluje do obrobku. V případě frézování čelní frézou a při velké hloubce řezu má síla tendenci vychylovat se ve směru kolmém na směr posuvu stolu [1].

Na výsledný směr řezných sil má v nemalé míře vliv také úhel nastavení hlavního ostří κ_r . Nejběžnějšími hodnotami využívanými v praxi jsou $\kappa_r = 90^\circ$, $\kappa_r = 45^\circ$ a $\kappa_r = 10^\circ$ (viz obr. 12). U frézování čelní frézou (viz obr. 11) menší úhly nastavení hl. ostří např. $\kappa_r = 10^\circ$ způsobují postupnější vniknutí břitu do materiálu, což způsobuje menší radiální tlak, tudíž i velikost radiálního vektoru celkové řezné síly, naopak axiální směr vektoru celkové řezné síly v tomto případě převažuje jak u frézování čelní, tak i válcovou frézou. Toho se využívá u fréz s vysokým posuvem a u ponorných fréz, což umožňuje nástroji snášet náročnější řezné podmínky, kdy je tloušťka třísek malá, ale velký posuv stolu, navíc je snížen i sklon frézy k vibracím, což umožňuje vysoký úběr obráběného materiálu. U úhlu nastavení hlavního ostří $\kappa_r = 90^\circ$ má vektor celkové řezné síly radiální směr a na obrobek není kladen tak velký axiální tlak (jako je tomu v případě $\kappa_r = 10^\circ$), což je výhodné u obrobků slabé konstrukce nebo tenkostěnných profilů. Hlavní aplikací $\kappa_r = 90^\circ$ je frézování do rohu, kde lze takto získat pravý úhel. Nevýhodou $\kappa_r = 90^\circ$ je nižší stabilita

frézy při jejím dlouhém vyložení, kdy v důsledku radiálního směru působení síly může docházet k jeho průhybu a tím pádem i vzniku vibrací, další nevýhodou mohou být vyšší nároky na upnutí obrobku. U fréz s VBD, kde úhel nastavení hlavního ostří $\kappa_r = 45^\circ$ jsou axiální a radiální složka celkové řezné síly přibližně stejně velké, pak radiální a axiální tlaky působící na obrobek jsou také přibližně stejně velké. U čelního frézování se tak jedná o univerzální hodnotu nastavení úhlu hlavního ostří. Výhodou této hodnoty úhlu nastavení hlavního ostří je frézování obrobků z materiálu tvořící krátké třísky, nižší sklony k vibracím při delším vyložení nástroje nebo jeho slabším upnutí a možnost využití vyššího posuvu stolu při zajištění středního zatížení břitu VBD. U fréz s kruhovými VBD je hodnota úhlu nastavení hlavního ostří κ_r proměnná a pohybuje se v rozsahu $\kappa_r = 0^\circ$ až 90° v závislosti na hloubce řezu a_p , stejně tak se mění i směr vektoru celkové řezné síly v závislosti na hloubce řezu [1, 2, 6, 9, 10].



Obr. 11 Úhly nastavení hlavního ostří κ_r při běžném frézování a jejich vliv na axiální a radiální vektory celkové řezné síly a maximální tloušťku třísky h_{ex} [6].



Obr. 12 Výslednice celkové řezné síly F_c pro typické hodnoty úhlu nastavení hlavního ostří κ_r [10].

1.3 Řezný výkon

Celková řezná síla F_c a řezná rychlost v_c určují *řezný výkon* P_c , který je dán vztahem 1.17, a někdy je také označován jako výkon efektivní či užitečný. Vyjadřuje výkon na vřetenu stroje. Navíc existuje ještě tzv. *výkon elektromotoru obráběcího stroje* označovaný P_m (viz vztah 1.18), jenž by měl být vyšší než řezný výkon, jelikož mezi elektromotorem a vřetenem dochází ke ztrátám, což zohledňuje veličina η_m tzv. *mechanická účinnost obráběcího stroje* [2].

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60} \quad [W], \quad (1.17)$$

$$P_m = \frac{P_c}{\eta_m} \quad [W], \quad (1.18)$$

kde: F_c [N] - celková řezná síla,
 v_c [m.min⁻¹] - řezná rychlost,
 η_m [-] - mechanická účinnost obráběcího stroje.

1.4 Jednotkový čas strojní

Jednotkový čas strojní t_{AS} nebo-li čas automatického chodu stroje je doba, po kterou stroj pracuje, aniž by byla přítomna obsluha stroje. Pro základní typy frézování se vychází z délkových poměrů drah ve směru posuvu mezi obrobkem a frézou, jak je zobrazeno na obr. 13. Obecně je jednotkový čas strojní vyjádřen vztahem 1.19 [2, 11]:

$$t_{AS} = \frac{L}{v_f} \quad [min], \quad (1.19)$$

kde: L [mm] - dráha nástroje ve směru posuvového pohybu,
 v_f [mm.min⁻¹] - posuvová rychlost.

Hodnoty *dráhy nástroje ve směru posuvového pohybu* L pro:

- válcové frézování (obr. 13a) se vyjádří dle vztahu 1.20 [2]:

$$L = l + l_n + l_p + l_{nf} \quad [mm], \quad (1.20)$$

kde: l [mm] - délka obráběné plochy,
 l_n [mm] - délka nájezdu,
 l_p [mm] - délka přejezdu,
 l_{nf} [mm] - délka nájezdu frézy,

délka nájezdu frézy l_{nf} se spočte dle vztahu 1.21 [2]:

$$l_{nf} = \sqrt{H \cdot (D - H)} \quad [mm], \quad (1.21)$$

kde: H [mm] - hloubka odebírané vrstvy,

D [mm] - průměr frézy,

- čelní hrubé frézování asymetrické (obr. 13b) se vyjádří dle vztahu 1.22 [2]:

$$L = l + l_n + l_p + \frac{D}{2} - l_{pf} \quad [\text{mm}], \quad (1.22)$$

kde: l_{pf} [mm] - délka přejezdu frézy,

délka přejezdu frézy l_{pf} se spočte dle vztahu 1.23 [2, 11]:

$$l_{pf} = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{B}{2} + e\right)^2} \quad [\text{mm}], \quad (1.23)$$

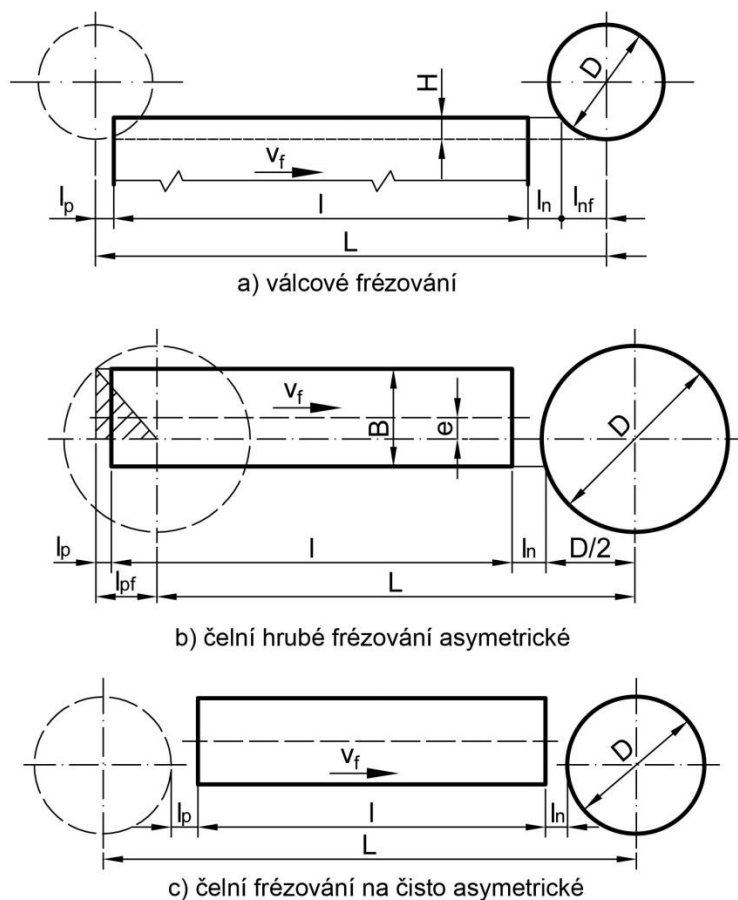
kde: B [mm] - šířka frézované plochy,

e [mm] - radiální vzdálenost mezi osou obrobku a frézou,

v případě čelního hrubého frézování symetrického je ve vztahu 1.23 $e = 0$ [2],

- čelní frézování na čisto asymetrické (obr. 13c) se vyjádří dle vztahu 1.24 [2]:

$$L = l + l_n + l_p + D \quad [\text{mm}]. \quad (1.24)$$



Obr. 13 Vyjádření dráhy frézy ve směru posuvového pohybu [2].

1.5 Frézovací nástroje




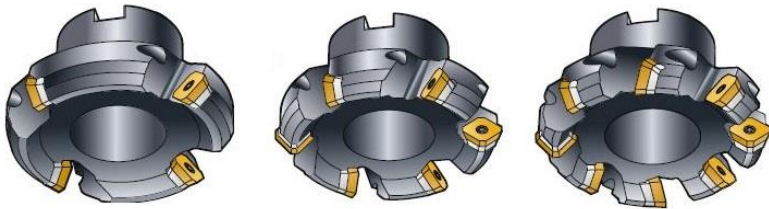


Frézy, jakožto vícebřité nástroje, mají tyto břity (VBD) umístěny po obvodu své pracovní části, která koná rotační pohyb. Pro svou univerzálnost se s postupem času vyvinuly v mnoho typů a konstrukcí, proto se dají dle různých hledisek uspořádat do různých skupin a podskupin. Mezi základní hlediska patří rozdělení fréz dle své konstrukce a to buď na frézy monolitní (celistvé), které mají těleso a břity z rychlořezné oceli (HSS), respektive u malých fréz ze slinutého karbidu (SK), anebo frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami (VBD) viz obr. 14, které jsou po skončení své životnosti vyměněny za nové. U fréz s VBD se pro tělo destičky používá slinutého karbidu a na něm povlaky na bázi TiC, TiCN, TiN, Al_2O_3 atd. Moderní materiály VBD jsou cermety, řezná keramika na bázi Al_2O_3 nebo Si_3N_4 , polykrystalický kubický nitrid bóru (PCBN), kubický nitrid bóru (CBN) nebo polykrystalický diamant (PCD). Další základní rozdělení fréz je dle hlediska umístění břitů na fréze, kde se rozlišují frézy válcové, čelní nebo čelní válcové. Dle způsobu upnutí jsou rozlišovány frézy nástrčné nebo stopkové. Dle smyslu otáčení při pohledu od vřetena frézky jsou rozlišovány frézy levořezné nebo pravořezné. Podle rozteče zubů jsou rozlišovány frézy jemnozubé (s malou roztečí mezi zuby, používány pro dokončovací frézování - nejvyšší jakost obrobené plochy), polohrubozubé (se střední roztečí mezi zuby, používány pro středně velké úběry materiálu) a frézy hrubozubé (s velkou roztečí mezi zuby, používány u hrubovacích operací a při velmi velkých úběrech materiálu). Klidného chodu bez vibrací se dosáhne tím, že jsou minimálně dva břity v záběru. Dle technologického hlediska je možno dělit frézy pro frézování rovinných ploch (válcové, čelní frézy a frézovací hlavy) nebo tvarových ploch (tvarové frézy, kopírovací frézy, frézy na drážky klínů a per, frézy na upínací drážky). Dále se dají frézy rozdělit dle tvaru zubů a to na frézy se zuby frézovanými nebo podsoustruženými. U frézovaných zubů jsou hřbetní i čelní části zubu tvořeny rovinnými plochami a je důležité ostřit zub pouze na hřbetní části. U podsoustružených zubů je hřbet zubu tvořen částí tzv. Archimédovy spirály, čelo rovinnou plochou. V neposlední řadě dělení fréz je dělení z hlediska geometrického tvaru funkční části frény, kde jsou rozlišovány frézy válcové, kotoučové, tvarové, kopírovací, radiusové, drážkovací nebo úhlové. Všechny výše popsané typy fréz názorně zobrazuje tab. 3 a ukázka fréz a jejich aplikace je na obr. 16 [2, 8, 12, 19].



Obr. 14 Ukázka konstrukce stopkové frézy s VBD pro čelní frézování [13].

Tab. 3 Rozdělení frézovacích nástrojů dle základních hledisek [12, 13, 14, 15, 16, 17, 19].

| Rozdělení fréz | |
|------------------------------|--|
| dle konstrukčního uspořádání | |
| a) monolitní |  |
| b) s VBD |  |
| dle umístění břitů na fréze | |
| a) válcová |  |
| b) čelní |  |
| c) čelní válcová |  |

| dle způsobu upnutí | |
|---|--|
| a) nástrčná |  |
| b) stopková |  |
| dle smyslu otáčení ve směru pohledu od vřetena frézky | |
| a) pravořezná |  |
| b) levořezná | |
| dle rozteče zubů | |
| a) jemnozubé |  |
| b) polohrubozubé | |
| c) hrubozubé | |
| dle tvaru zubů | |
| a) s frézovanými zuby |  |
| b) podsoustružením |  |

dle geometrického tvaru funkční části

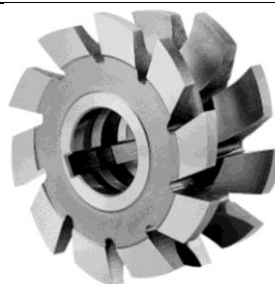
a) válcové



b) kotoučové



c) tvarové



d) kopírovací



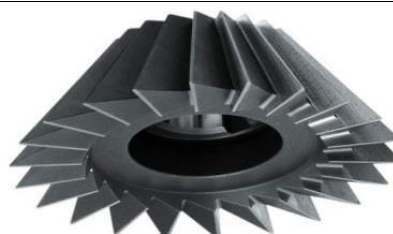
e) rádiusové



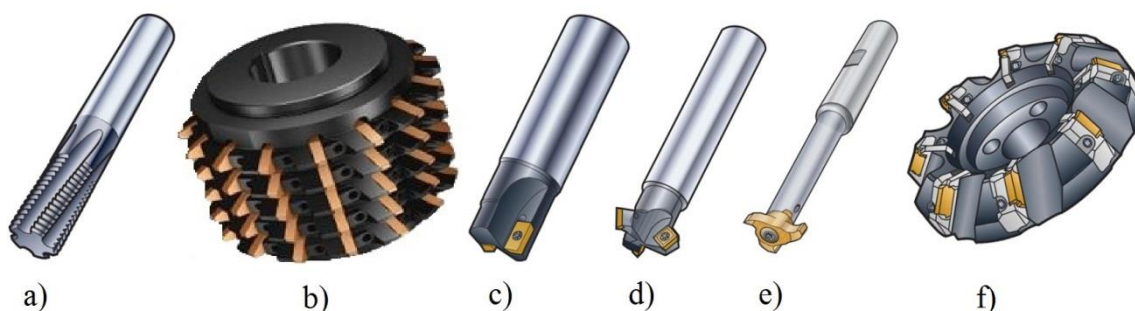
f) drážkovací



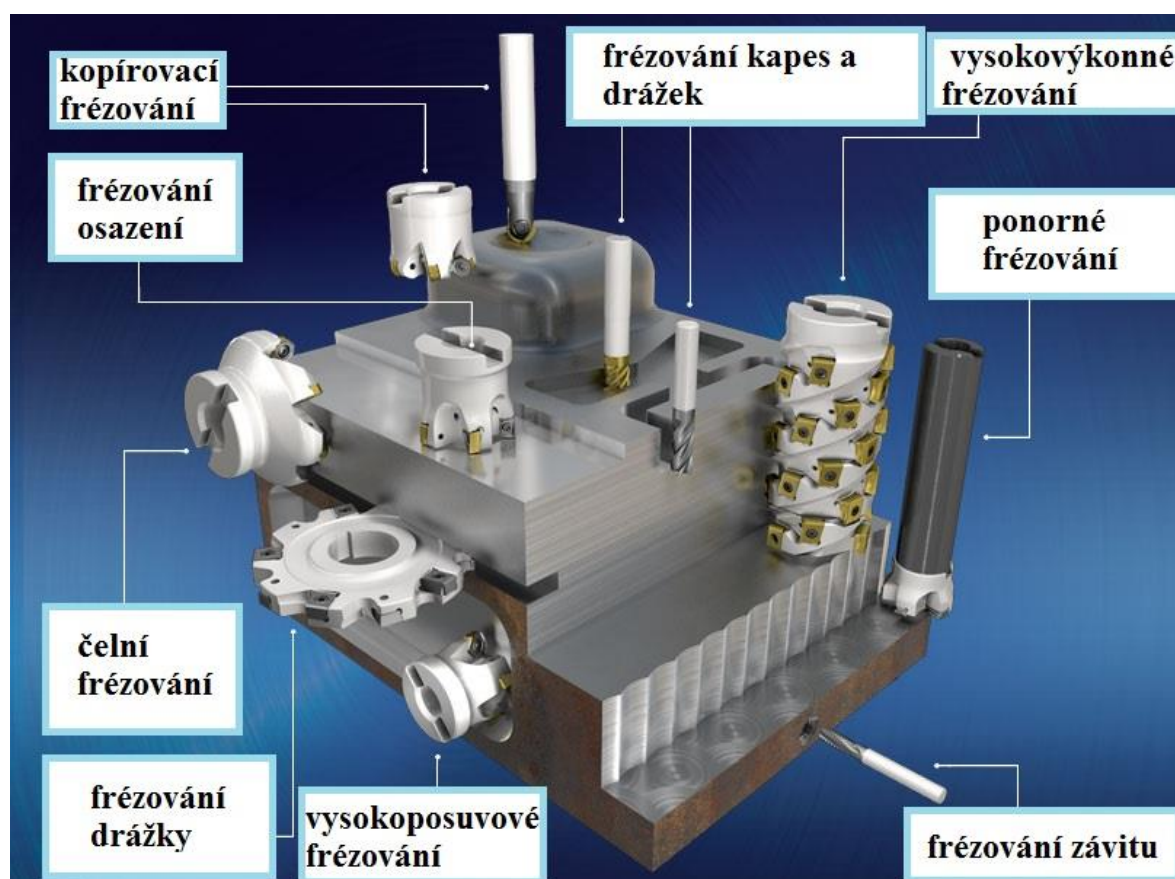
g) úhlové



Jako poslední existuje ještě speciální skupina (viz obr. 15) rozdělení fréz a to dle technologického hlediska, do které se řadí frézy na výrobu závitů, frézy na výrobu ozubení u ozubených kol, vrtací frézy, frézy pro srážení hran, na výrobu T-drážek a frézovací hlavy řadicí se do skupiny čelních fréz (skládající se z několika segmentů osazených vyměnitelnými břitovými destičkami) [2].



Obr. 15 Technologické typy fréz z nabídky firmy Sandvik Coromant [15, 18].



Obr. 16 Ukázka některých aplikací frézovacích nástrojů od firmy ISCAR [14].

1.6 Frézovací stroje

Frézovací stroje se nazývají frézky. Existuje celá řada modelů frézek lišících se dle svého vybavení a příslušenství, kde lze pořídit frézku od několika stovek tisíců až po moderní víceosá obráběcí centra, jejichž cena se pohybuje v řádech milionů, někdy i desítek milionů korun českých. Zpravidla lze frézky členit do čtyř základních skupin (konzolové, stolové, rovinné a speciální). Z hlediska řízení pracovního cyklu stroje jsou rozlišovány frézky s ručním řízením nebo s řízením programovým (ať už jde o automatizaci tvrdou nebo pružnou). Výsledná velikost frézky je určena několika faktory, zpravidla šířkou upínací plochy pro obráběný materiál a velikostí kužele ve vřetenu pro upnutí nástroje. Mezi další faktory podílející se na velikosti frézky se řadí maximální délka pohybu pracovního stolu nebo maximální délka pohybu vřeteníku, rozsah otáček vřetena, popřípadě dosažitelnost kvalitativních parametrů u výsledné obrobene plochy [2, 19].

1.6.1 Konzolové frézky

Jsou charakteristické svou výškovou přestavitelností konzoly, která se pohybuje ve směru stojanu. Na ní je umístěn pohyblivý příčný stůl s podélným stolem pracovním. Touto kombinací pohybů lze dosáhnout přestavování upnutého obrobku na pracovním stole ve všech třech vzájemně na sebe kolmých osách. Tento typ frézek je vhodný pro frézování jak rovinných, tak tvarových ploch u malých a středně rozměrných obrobků a to jak v kusové, tak i malosériové výrobě. Konzolové frézky (viz obr. 17) se dále dělí na svislé, vodorovné a univerzální [2, 19]



Obr. 17 Konzolová frézka [20].

1.6.2 Stolové frézky

Tento typ frézky není vybaven konzolou, nýbrž podélným a příčným stolem umístěným přímo na základně frézky, to znamená, že pohyb v rovině zajišťuje stůl a pohyb ve svislém směru je zajišťován pomocí přemísťujícího se vřeteníku po vedení stroje. U tohoto typu lze kvalitativně a zároveň produktivně frézovat jak rozměrnější, tak těžší obrobky. Vyráběna je jak varianta s vřetenem svislým (viz obr. 18), tak i podélným [2, 19].



Obr. 18 Svislá stolová frézka [21].

1.6.3 Rovinné frézky

Řadí se mezi nejvýkonnější typy frézek v důsledku robustnějších konstrukcí, poněvadž jsou schopny frézovat velmi těžké a rozměrné obrobky. Pracovní stůl má pouze jeden stupeň volnosti, čili se pohybuje pouze ve vodorovném směru osy X, vřeteník s frézou se pohybuje ve zbývajících dvou osách. Rovinné frézky existují i s víceméně vřeteníků (zároveň vodorovné i svislé), taktéž mohou být tyto frézky konstruovány i jako portálové (viz obr. 19). Uplatňují se pro kusovou, malosériovou i sériovou výrobu. Pro frézování vodorovných, svislých i šikmých ploch jsou nejčastěji užívanými nástroji frézovací hlavy, pro frézování úzkých ploch a drážek frézy stopkové [2, 19].



Obr. 19 Rovinná frézka portálová [22].

1.6.4 Speciální frézky

Do této kategorie se řadí většinou starší jednoúčelové frézky, ale současnými zástupci této skupiny jsou především frézky na výrobu ozubení čelních kol, na výrobu ozubení kuželových kol apod. [19].

1.6.5 CNC obráběcí centra

Tato skupina frézek je v současné moderní výrobě dobře zastoupena nejhojněji. Jedná se o 3 až 5-ti osé stroje zpravidla určené pro frézování nerotačních obrobků (viz obr. 20). Existují varianty jak s horizontální, tak i vertikální osou vřeten. Nosná část se dělí na nástrojovou část se třemi navzájem kolmými číslíkově řízenými osami X, Y, Z a na stavebnicově proměnnou obrobkovou část se dvěma rotačníma osama A a B. Existují i varianty s jinými kombinacemi os. Variabilita těchto CNC obráběcích center umožňuje frézovat obrobky všech velikostí, je závislá pouze na parametrech konkrétního obráběcího CNC centra [19].



Obr. 20 Moderní pětiosé obráběcí centrum firmy Hermle [23].

Každé CNC obráběcí centrum je dáno svými technickými parametry lišící se dle konkrétního výrobce. Mezi základní technické parametry každého CNC obráběcího centra patří:

- pracovní oblast (maximální rozměr obrobku, který je schopno centrum vyfrézovat, dále rozměr stolu a rozsah jeho posuvu),
- počet pracovních os (nejméně 3, nejvíce 5 os),
- vřeteno (maximální velikost otáček, výkon, krouticí moment a rozměr kužele pro upnutí nástroje),
- výměna nástroje (ruční / automatická – stupeň automatizace, kapacita nástrojového zásobníku),
- ostatní (celkové rozměry stroje, jeho hmotnost, popř. příkon).

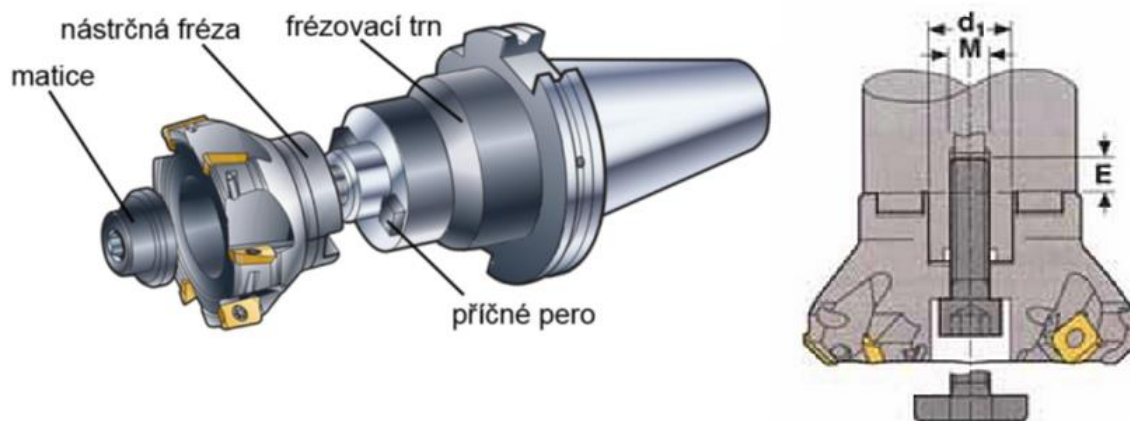
Před nákupem CNC obráběcího centra je podle těchto parametrů rozhodováno, jestli zvolený stroj je schopen splnit požadavky na zvolenou součást, zejména velikost pracovní oblasti je prvotním určujícím parametrem při koupi stroje. Mezi další faktory určující výběr správného CNC obráběcího centra jsou volba dle pohybu stroje v pracovních osách, volba dle vybavení pracovní hlavy stroje, dále volba dle vybavení pracovního stolu nebo volba dle softwarového vybavení, které daný podnik používá [24].

1.7 Způsoby upínání fréz a obrobků

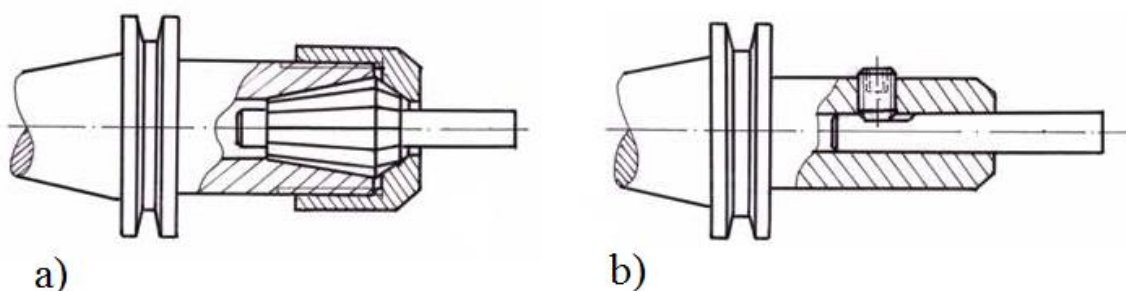
Jelikož frézy pracují s poměrně velkými hodnotami posuvů a řezných rychlostí, je zapotřebí, aby upínač snášel bezproblémově takováto zatížení na něj kladená. U menších fréz je pro dodržení řezné rychlosti nutno pracovat s vysokými hodnotami otáček, to vyžaduje přesné upnutí nástroje s minimalizací jeho obvodového házení, takže musí navíc být ještě dokonale dynamicky vyvážen. U vysokých posuvů je kladeno na nástroj ohybové namáhání, což může být u dlouhého vyložení nástroje problémem, tím pádem je nutné, aby byl upínač z materiálu s vysokou pevností v ohybu. Navíc musí být schopen přenést velké upínací síly na nástroj stejně jako velké krouticí momenty, čili by měl být z takového materiálu, aby odolával jak ohybu, tak i krutu. Ideálně by měl mít navíc schopnosti tlumit vibrace a přivádět řeznou kapalinu do řezného místa, umožňovat snadné upínání a uvolňování při výměně nástroje stejně jako jeho bezpečný provoz a užívání, k tomu všemu mít také vysokou životnost při nízkých nákladech provozu [19].

Pro upnutí nástrčných frézovacích nástrojů je používáno tzv. frézovacích trnů. Existují tři typy frézovacích trnů dle jejich upínacích kuželů, a to Morse (kuželovitost 1:19 až 1:20), metrický (kuželovitost 1:20) a strmý (kuželovitost 1:3,5). Metrický kužel a Morse kužel mohou díky své samosvornosti přenést krouticí moment z vřetena na frézovací trn, což je umožněno pomocí obdélníkového vybrání na konci vřetena a zploštělého nákrůžku na konci frézovacího trnu, který do něj zapadá. Strmý kužel způsobuje středění frézovacího trnu v pracovním vřetenu, zatímco krouticí moment je přenášen dvěma kameny upevněnými na čele vřetena, jenž zapadají do vybrání na nákrůžku trnu. U fréz s dlouhým vyložení je zajištěno středění pomocí volně navlečených středících kroužků na frézovacím trnu. Pro zajištění co nejužšího upnutí trnů se frézy upínají co možná nejblíže k vřetenu a u fréz s dlouhým vyložení se výsuvné rameno přisune k fréze nejblíže, jak jen to jde. Čelní válcové a čelní frézy stejně jako malé frézovací hlavy jsou upínány letmo na krátkém frézovacím trnu (viz obr. 21), kde unášení je zajištěno podélným či příčným perem. Frézy s kuželovou stopkou se do upínacího kužele ve vřetenu frézky upínají

za pomoci redukčních pouzder, těch se použije také tehdy, neshoduje-li se kužel frézovacího trnu s kuželem vřetena. V případě fréz se stopkou válcovou se pro upnutí do vřetena frézky užije sklíčidla s upínacím pouzdrem (viz obr. 22a). Existuje ještě upnutí typu Weldon (obr. 22b), tj. takové, kdy je na stopce nástroje rovnoběžně s osou vyfrézována dosedající plocha, za kterou je pomocí šroubů nástroj upnut [2, 19, 25].

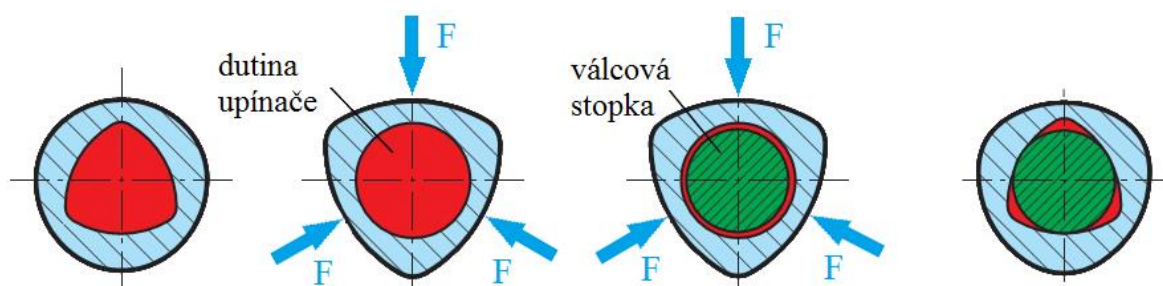


Obr. 21 Ukázka upnutí nástrčné frézy na krátký frézovací trn se strmým kuželem [15, 25].



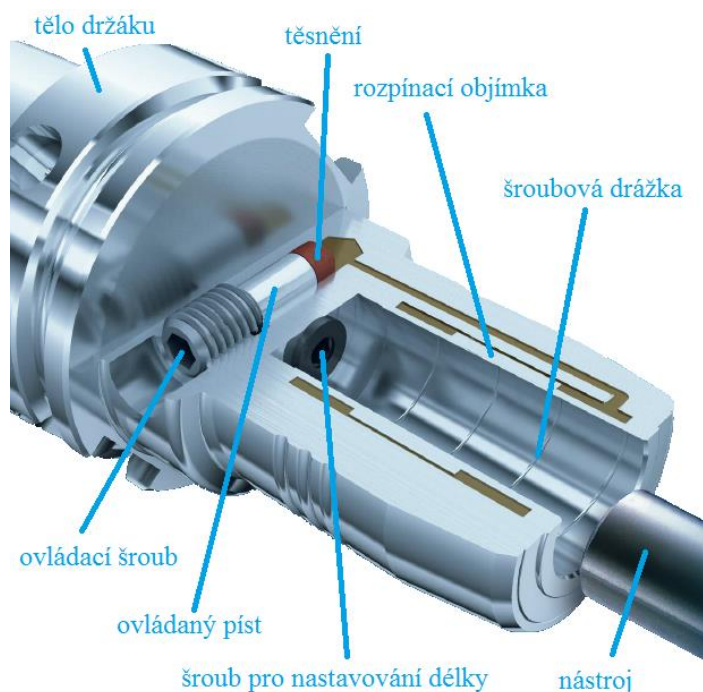
Obr. 22 a) Upnutí pomocí sklíčidla s upínací kleštinou b) upnutí typem Weldon [25].

Mezi současné moderní upínače nástrojů se řadí upínací systém fungující na principu pružné deformace tělesa upínače známý jako TRIBOS od firmy Schunk, který lze použít pouze na frézy s válcovou stopkou. Jde o upínací systém, který pro upnutí, respektive uvolnění stopky funguje na principu změny tvaru vnitřní dutiny za působení vnější síly. K upnutí a uvolnění nástroje do upínače je zapotřebí použít speciální ručně ovládaný přípravek. Celý proces upnutí má 4 fáze (viz obr. 23). V uvolněném stavu je upínací díra v upínači přibližně polygonálního tvaru, po vložení do ručně ovládaného přípravku dojde k zatížení tělesa a z polygonálního tvaru díry v upínači se stane díra kruhového tvaru. Poté je vložena stopka frézy a upínač je odlehčen, čili se vrátí do výchozího polygonálního stavu, čímž dojde k upnutí a vystředění frézy. Výhodou tohoto systému je bezúdržbový provoz, rychlost výměny frézy se pohybuje kolem 30 sekund a také absence pohyblivých mechanických částí se příznivě projeví na výsledné přesnosti frézování a životnosti upínače stejně jako trvanlivosti fréz. Předností tohoto systému upínání je vysoká radiální tuhost a absolutní osová symetrie. Tohoto lze hojně využít při HSC (High Speed Cutting) režimu práce stroje. Navíc lze i upnout stopky opatřené zafrézovanými plochami. Ke zvýšení univerzality tohoto upínacího systému se využívá pouzder vkládaných do dutiny upínače, což umožňuje upínání vícero průměrů fréz v jednom upínači [2, 19, 25].



Obr. 23 Princip upínání systémem TRIBOS [26].

Mezi další moderní systémy upínání se řadí upínače využívající principu hydraulického upnutí stopky nástroje pomocí deformace vnitřního pouzdra upínače. Mezi nejznámější patří upínače řady TENDO (viz obr. 24) od firmy Schunk, jenž pracují na principu vyvolání změny tlaku hydraulického média pomocí pootočení upínacího šroubu, který funguje podobně jako píst. Pro zachycení oleje a různých nečistot vytlačených ze stykových ploch je na upínací ploše dutiny upínače vytvořena šroubová drážka, čímž se zároveň zvýší pevnost a spolehlivost upnutí, taktéž mají schopnost velmi dobře tlumit vibrace a jsou nenáročné na údržbu. Házivost fréz u tohoto typu upnutí je maximálně 3 μm . Pro přestavení na jiný průměr frézy se využívá přesných vložek. Tento typ upínačů může upínat pouze stopky s hladkou plochou s tolerancí h7. Dalším známým hydraulickým upínacím systémem fréz je systém CoroGrip od firmy Sandvik Coromant. CoroGrip je samosvorný, upínací mechanismus, který je ovládán působením hydraulického tlaku na samosvorný klín. Funguje obdobným způsobem jako TENDO, ale namísto pístového upínacího šroubu potřebuje k vyvození tlaku a z něho vyplývající upínací síly externí zdroj tlaku. Pro upnutí frézy je zapotřebí tlaku přibližně 500 barů, pro odepnutí tlak kolem 800 barů. Házivost se u tohoto typu pohybuje v rozmezí 2 až 5 μm . Výhodou tohoto typu je možnost vnitřního přívodu řezné kapaliny tělem upínače. Obecně pro všechny typy hydraulických upínačů platí omezení provozní teploty na 50°C [19, 25].



Obr. 24 Princip hydraulického upínacího systému TENDO [26].

Dalším moderním systémem je upínání nástrojů založeném na principu změny objemu materiálu v tepelně smrštelných upínačích. Upínač je pomocí indukčního ohřevu zahřát na teplotu od 250 až po 350°C, jelikož zvýšením teploty dojde k tepelné roztažnosti materiálu, v důsledku toho se průměr upínací díry upínače zvětší (řádově setiny mm), čímž je umožněno vložení nástroje (nejčastěji monolitní frézy s válcovou stopkou vyrobené z HSS nebo SK), poté je upínač ochlazen, čímž dojde k rovnoměrnému rozložení radiálních tlaků po celé upnuté délce nástroje. V případě uvolňování nástroje z upínače je zapotřebí zahřát jak upínač, tak i nástroj (upínač by se měl roztahovat více, než nástroj), dojde k rozdílu mezi součiniteli tepelné roztažnosti nástroje a upínače, čímž se zvětší oba průměry a nástroj je poté možno vyjmout. Tento typ upnutí dosahuje ještě větších upínacích sil než mechanické nebo hydraulické upínací systémy. K výhodám tohoto typu upnutí patří jednoduchost konstrukce, možnost vnitřního přívodu řezné kapaliny a možnost upnutí nástroje s vyfrézovanou plochou (Weldon). Hodí se pro frézování při vysokých otáčkách, kdy se radiální házivost pohybuje v hodnotách kolem 3 μm . V důsledku štíhlosti dřívku upínače se hodí pro frézování hlubokých dutin. Nevýhodou tohoto typu upnutí nástrojů může být požadavek na správné přiřazení průměru nástroje a toleranci jeho válcové upínané stopky, kde je požadováno pro průměr stopky do 5 mm tolerance h5, pro průměry větší než 5 mm je požadována tolerance h6 (což je podmínka bezpečného upnutí i odejmutí) [19, 25, 27].



Obr. 25 Tepelně rozpínací pouzdra [27].

Existuje skupina tzv. modulárních upínacích systémů, které se uplatní především u obráběcích center s velkou paletou nástrojů v zásobníku. Nástroje jsou v podobě krátkých hlavic, kde jejich upnutí je umožněno za pomoci univerzálních adaptérů. Příkladem takového modularitu je systém Coromant Capto od společnosti Sandvik Coromant, kde je pomocí několika málo upínačů možnost upnout u víceúčelových obráběcích center jak nástroje frézovací, tak i soustružnické, vrtací apod. [28].



Obr. 26 Modulární systém upínání Coromant Capto [28].

Při frézování vznikají důsledkem několika břitů v záběru velké řezné síly, což klade značné nároky na upnutí obrobků. Pro správný průběh frézování je nutné, aby upnutím nebyl obrobek zdeformován a aby byly jak ofrézovaná, tak i upínací plocha obrobku co možná nejbližší k vřetenu frézky. K zajištění spolehlivého a dostatečně tuhého upnutí obrobků se při frézování využívá celá škála upínacích elementů. U menších obrobků se hojně využívají svěráky, k upnutí větších obrobků se využívá upínek, podpěrek, které se připevňují do T-drážek stolu pomocí šroubů se čtvercovou hlavou. U přesných obrobků se používají technologické palety s přesně vymezenou polohou zafixování [29].

2 ROZBOR OBRÁBĚNÉHO MATERIÁLU

Poněvadž jedním z cílů této práce je volba vhodného materiálu pro výrobu těhlice předního kola, byla pro její výrobu zvolena slitina hliníku s obchodním názvem CERTAL. V této kapitole bude tedy proveden základní teoretický rozbor slitin hliníku.

2.1 Hliník

Hliník (chemická značka Al) je v přírodě třetím nejrozšířenějším prvkem, v zemské kůře je ho obsaženo cca 8% nejčastěji se vyskytujícího v horninách bauxit, kryolit kaolín, korund atd. Hliník patří do skupiny neželezných kovů, kde spadá do podskupiny lehkých kovů. Je to nepolymorfni kov stříbrné barvy s FCC (Face Centered Cubic – kubickou plošně centrovanou) krystalickou mřížkou. Mechanické vlastnosti čistého hliníku jsou špatné, pevnost v tahu R_m se pohybuje v rozsahu 70 MPa v měkkém stavu a ve stavu tvrdém 130 MPa (po tváření za studena), proto se samostatný čistý hliník nepoužívá jako konstrukční materiál, ale musí být vyráběn ve formě slitin s přísadou jiných prvků. Výroba hliníku se provádí elektrolyticky. Čistý hliník se používá pouze v elektrotechnickém průmyslu jako elektrovedný materiál, v chemickém a potravinářském průmyslu nachází uplatnění jako materiál s dobrou odolností proti korozi v kyselém prostředí (při působení alkalických látek je naopak malá) a tepelnou vodivostí. Ve formě tenkých fólií nachází uplatnění jako obalový materiál nebo jako ochranná alitovaná vrstva na površích výrobků z oceli proti korozi a vzniku okují. V tab. 4 jsou uvedeny základní fyzikální vlastnosti čistého hliníku a v tab. 5 základní mechanické vlastnosti hliníku ve vyžíhaném stavu [30, 31].

Tab. 4 Základní fyzikální vlastnosti čistého hliníku [30, 32, 33].

| Fyzikální vlastnost | | čistý Al |
|--------------------------------------|--------------------------------------|----------|
| Hustota | [kg.m ⁻³] | 2700 |
| Tavicí teplota | [°C] | 660 |
| Stahování při tuhnutí | [%] | 7,1 |
| Délkové smrštění v tuhém stavu | [%] | 1,85 |
| Skupenské teplo tání | [kJ/kg] | 387 |
| Měrná tepelná kapacita | [kJ/kg.K] | 0,9 |
| Tepelná vodivost | [W.m ⁻¹ K ⁻¹] | 247 |
| Měrný elektrický odpor (rezistivita) | [Ωmm ² m ⁻¹] | 0,0285 |

Tab. 5 Základní mechanické vlastnosti hliníku ve vyžíhaném stavu [32, 33].

| Mechanická vlastnost | | vyžíhaný stav |
|---------------------------|-------|---------------|
| Tažnost | [%] | 25 |
| Tvrdost | [HB] | 20 |
| Mez pevnosti v tahu R_m | [MPa] | 60 |
| Modul pružnosti v tahu E | [GPa] | 73 |

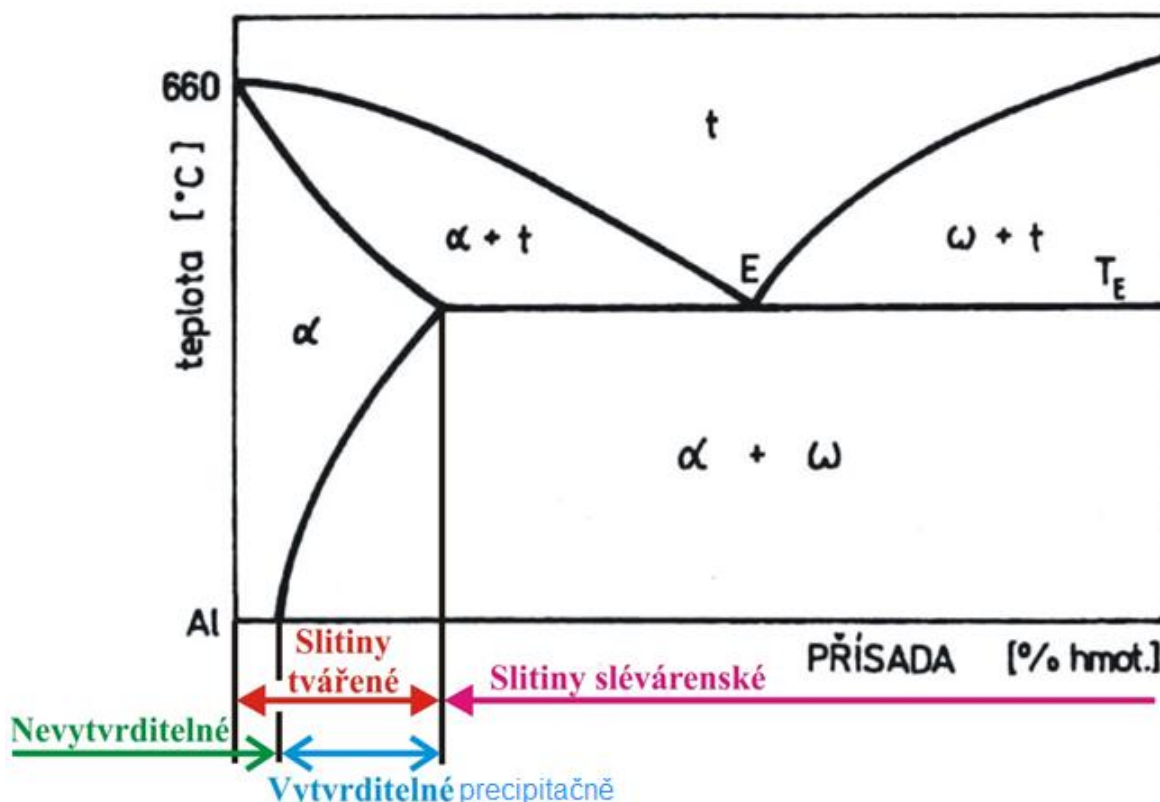
2.2 Slitiny hliníku

Jak již bylo zmíněno, čistý hliník je jako konstrukční materiál nevhodný kvůli své malé pevnosti v tahu, proto se vyrábí jeho slitiny. Přidáním přísadových prvků se zvýší mechanické a lepší technologické vlastnosti. Výsledné vlastnosti slitiny jsou určeny množstvím a kombinacemi použitých přísadových prvků, z nichž nejvýznamnějšími jsou křemík, měď a hořčík, popř. zinek nebo mangan. Mezi přednosti slitin hliníku patří především nízká měrná hmotnost a poměrně dobrá pevnost, což může v konečném důsledku řadit tyto slitiny na úroveň ocelí, popř. mít ještě lepší mechanické vlastnosti s menší hmotností, než by měla ocel při stejné měrné hmotnosti. Dle přísadových prvků se rozlišují tyto základní typy slitin hliníku s názvy: slitiny Al – Si (siluminy),

slitiny Al – Cu (duralaluminium),

slitiny Al-Mg (hydronalium).

Nejčastější dělení slitin hliníku je podle způsobu zpracování, kdy jsou rozlišovány slitiny pro tváření a slitiny pro odlitky. Dle jiného kritéria lze dělit hliníkové skupiny na vytvrditelné a nevytvrditelné, podle jejich schopnosti zvýšit svou tvrdost a pevnost tepelným zpracováním (vytvrzováním), což souvisí s jejich chemickým složením, tedy jejich polohou v rovnovážném binárním diagramu. Schematické zobrazení tohoto dělení je zobrazeno na obr. 27 [30, 31].



Obr. 27 Schéma obecného rovnovážného diagramu binárních slitin hliníku [31].

Hlavními odvětvími, kde je využíváno slitin hliníku, jsou automobilový průmysl (bloky motorů), letecký průmysl (konstrukční materiál, v současnosti nahrazován kompozity), potravinářský průmysl (alobal), strojírenství (odlitky, konstrukční součástky, profily), stavebnictví (profily pro výrobu dveří a oken) a elektrotechnika (kabely, dráty) [32].

2.2.1 Slitiny hliníku pro tváření

Slitiny hliníku pro tváření vykazují obecně lepší mechanické vlastnosti než slitiny hliníku na odlitky. Pro tento typ slitin je požadavek na dobrou tvařitelnost za tepla i za studena. Jsou rozlišovány dvě podskupiny a to slitiny s nízkou pevností s dobrou odolností proti korozi a slitiny s vysokou pevností s nízkou odolností proti korozi [31].

a) Slitiny s nízkou pevností s dobrou odolností proti korozi

Do této podskupiny se řadí slitiny Al-Mg, Al-Mg-Si a Al-Mn. Jelikož neobsahují Cu, mají dobrou odolnost proti korozi bez povrchové ochrany, ale nelze je tepelným zpracováním podstatněji zpevnit (vytvdit). Mezi přednosti těchto slitin se řadí jejich dobrá svařitelnost, tvařitelnost, dobrá odolnost proti lomu a odolnost proti zatížení vibracemi. Mezi hlavní představitele této podskupiny se řadí následující slitiny [31].

- Slitiny Al-Mg

Pro tuto slitinu je maximální obsah Mg 6 hmotnostních %. U většího obsahu Mg má slitina sklony ke korozi po hranicích zrn, zejména při mechanickém zatížení. Tento typ slitiny nedosahuje příliš vysokých hodnot meze pevnosti (v žíhaném stavu pouze $R_m = 140$ až 200 MPa). Zvýšení této meze nelze dosáhnout tepelným zpracováním, ale lze dosáhnout deformačním zpevněním v podobě tváření za studena se stupněm deformace 20 až 30 %, čímž se dosáhne hodnot meze pevnosti až 420 MPa. U většího stupně deformace klesá jak tvárnost, tak i odolnost této slitiny proti korozi [31].

- Slitiny Al-Mg-Si

V nevytvrzeném stavu má tato slitina mez pevnosti okolo 150 MPa. U této slitiny lze oproti slitině Al-Mg zvýšit mez pevnosti pomocí tepelného zpracování a to až na hodnotu $R_m = 350$ MPa. Vyznačuje se dobrou tvárností a zároveň i svařitelností. Uplatnění této slitiny je převážně v leteckém průmyslu, stavebnictví a jako materiál dekoračních prvků v oblasti bytové architektury [31].

- Slitiny Al-Mn

U těchto slitin nelze obdobně jako u slitiny Al-Mg aplikovat zvýšení meze pevnosti pomocí tepelného zpracování, jelikož malé přesycení tuhého roztoku neumožňuje velké navýšení meze pevnosti. Svými vlastnostmi se tato slitina podobá slitině Al-Mg, ale po deformačním zpevnění nedosahuje takových hodnot meze pevnosti, pouze $R_m = 220$ MPa, čehož je v technické praxi využíváno pouze jako o něco pevnější náhrada čistého hliníku [31].

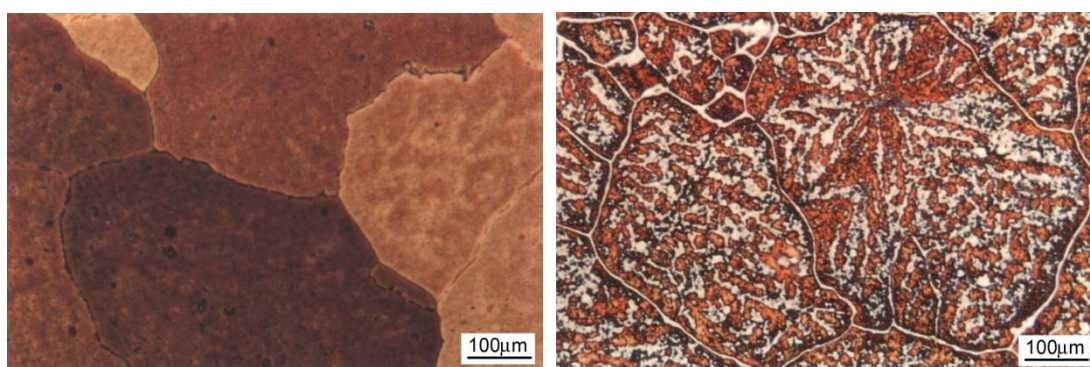
b) Slitiny s vyšší a vysokou pevností s nízkou korozní odolností

Tato podskupina nachází širší uplatnění jako konstrukční materiál než skupina nízkopevnostní s dobrou odolností proti korozi. Zvýšení mechanických vlastností, převážně meze pevnosti se u těchto slitin dosahuje tepelným zpracováním nebo tvářením za studena. Hlavními představiteli této skupiny jsou následující typy slitin [31].

- Slitiny Al-Cu-Mg

Ze skupiny slitin s vysokou pevností je tento představitel nejčastěji používaným materiálem. Typickými představiteli této slitiny jsou AlCu4Mg, AlCu4Mg1 a AlCu4Mg1Mn, které lze po tepelném zpracování vytvdit až na hodnotu meze

pevnosti $R_m = 530$ MPa a bývají označovány jako superduraly. Maximální teplota konstrukcí z těchto slitin je závislá na způsobu výroby následné teplotě stárnutí (obr. 28), přičemž teplota tepelně namáhaných konstrukcí by měla být nižší než teplota stárnutí. Slitiny s obsahem Mg od 2 do 2,5 hm. % jsou schopny odolávat dlouhodobě teplotám kolem 200°C . Hlavní oblastí využití těchto slitin je výroba výlisků a plechů, které se povrchově chrání tenkou vrstvičkou hliníku, aby byly chráněny proti korozi, jelikož měď obsažená v této slitině odolnost proti korozi snižuje, ale zase naopak zvyšuje pevnost a tvrdost. Další slitina spadající do této podskupiny je AlCu2Mg mající zvýšenou tvárnost důsledkem nižšího obsahu Cu. Uplatňuje se při výrobě nýtů, jelikož má pevnost ve střihu 200 MPa. Tyto nýty nepotřebují tepelné zahřátí k zabránění vzniku trhlin, takže se mohou deformovat za normální pokojové teploty [31].



Obr. 28 Slitina AlCu4Mg po rozpouštěcím žíhání (vlevo) a po stárnutí (vpravo) [34].

- Slitiny Al-Cu-Mg-Ni

Tyto slitiny mají zvýšenou stálost za vyšší teploty (300°C) než předchozí slitiny bez niklu. Nejznámějším představitelem je slitina AlCu2Mg2Ni, jenž se používá na výrobu lopatek kompresorů, rotorů a k výrobě pístů [31].

- Slitiny Al-Cu-Si-Mn

Jedná se o druh slitiny používané pro výrobu volně a zápusťkově kovaných výkovků. Zástupcem této podskupiny je slitina AlCu2SiMn [31].

- Slitiny Al-Cu-Fe-Si

Existuje ve formě slitiny AlCu8FeSi používané k výrobě pánví kluzných ložisek a také pro kovaná pouzdra [31].

- Slitiny Al-Cu-Bi-Pb

Přidáním bismutu a olova do slitiny hliníku a mědi způsobí, že při jejím obrábění vzniká krátká a drobivá tříska. Uplatnění nachází při výrobě součástek, které nejsou příliš silově namáhané [31].

- Slitiny Al-Si-Ni-Mg

Tato slitina by se dala dle chemického složení zařadit spíše do skupiny slitin hliníku pro odlitky. Tyto slitiny pro odlitky bývají známy pod názvem tvářené siluminy. Uplatnění nacházejí při výrobě součástí značně namáhaných tepelným i mechanickým zatížením, což jsou např. výlisky, výkovky nebo kované písty spalovacích motorů [31].

- Slitiny Al-Zn-Mg-Cu

Složení této slitiny hliníku z ní dělá nejpevnější slitinu mezi hliníkovými slitinami. V České republice se do této podskupiny řadí jediný představitel a to slitina AlZn6Mg2Cu dosahující po tepelném zpracování meze pevnosti $R_m = 500$ až 580 MPa. V zahraničí existují podobné slitiny s mezí pevnosti R_m až 730 MPa. Mezi nedostatky této slitiny patří sklon ke korozi pod zatížením, nižší lomová houževnatost a vyšší vrubová citlivost. Výsledné mechanické vlastnosti (odolnost proti korozi, odolnost proti únavě materiálu a odolnost proti lomu) jsou závislé na použitém způsobu tepelného zpracování [31].

Do této skupiny slitin hliníku patří i materiál CERTAL, ze kterého je vyrobena součást téhlice pravého předního kola formule Dragon 4.

- Slitiny Al-Li

Tento typ slitin není v České republice zatím vyráběn, jelikož výzkum v této oblasti slitin stále probíhá. Výroba této slitiny je problematická z důvodu vysoké reaktivnosti lithia, který na vzduchu snadno oxiduje, proto při jeho výrobě musí být zajištěno lití v inertní ochranné atmosféře argonu, popř. vakua nebo vzduchu s krycí struskou. Mezi předností těchto slitin je jejich nižší hmotnost o 5 až 10 % a zvýšený modul pružnosti v tahu E (77,5 až 81,2 GPa) oproti konvenčním slitinám hliníku. Pevnost v tahu $R_m = 420$ až 600 MPa je obdobná jako u duralových slitin Al-Cu-Mg. Další směr vývoje těchto slitin spočívá v přidávání přísad ve formě prvků scandia, berylia, yttria nebo kadmia [31].

2.2.2 Slitiny hliníku pro odlitky

Jsou předurčeny k výrobě tvarově složitých odlitků způsoby litím do písku, kovových forem nebo tlakovým litím. Mechanické vlastnosti slitin hliníku pro odlitky nedosahují tak vysokých hodnot jako slitiny hliníku pro tváření a odvíjí se od způsobu jejich lití. Pevnost v tahu dosahuje maximálně $R_m = 250$ MPa. V případě lití do písku vzniká hrubozrnná struktura, jejíž mechanické vlastnosti jsou oproti ostatním způsobům lití nejnižší. O něco jemnější struktura s lepšími mechanickými vlastnostmi vzniká při lití do kovových forem nebo při tlakovém lití [31].

- Slitiny Al-Si

Tento typ slitiny hliníku je nazýván binárním nebo jednoduchým siluminem. Podle slitinových bází se dá rozdělit do tří typů, kterými jsou siluminy podeutektické (s obsahem Si po 17 hm. %), siluminy eutektické (obsah Si se pohybuje kolem hodnoty 17 hm. %) a siluminy nadeutektické (s obsahem Si pohybujícím se od 17 hm. % do 24 hm. %). Nejlepší slévárenské vlastnosti (zabíhavost slitiny, sklon ke vzniku soustředěných staženin nebo ředin, sklon k naplynění taveniny a ke vzniku plynových dutin v odlitcích, sklon ke vzniku trhlin při tuhnutí a chladnutí) má binární silumin eutektický. Eutektikum obsažené v 40 až 70 hm. % eutektického siluminu, skládající se z tuhého roztoku α a fáze β složená z krystalů téměř čistého Si, dává schopnosti vysoké zabíhavosti slitiny, dále snižuje sklon k tvorbě trhlin za tepla a sklon k mikroporovitosti a lineárnímu smrštění. Další předností eutektického siluminu je dobrá odolnost proti korozi. Přes všechny tyto vlastnosti se slitina jako taková osvědčila pouze při výrobě hliníkových pájek. Tvarově složitě odlitky ze siluminů se vyrábí z následující skupiny, tzv. speciálních siluminů [30, 31].

- Speciální siluminy (Al-Si-Mg a Al-Si-Cu)

Do těchto siluminů se pro zvýšení mechanických vlastností přidává měď nebo hořčík, čímž dojde k jejich vytvrzení, což umožňuje těmto slitinám dlouhodobější mechanické zatížení za zvýšených teplot pohybujících se v rozsahu 250 až 275°C. Přidáním mědi nebo hořčíku má ale za následek snížení slévárenských vlastností, což může přinášet obtíže při jejich odlévání. Přidáváním dalších prvků, zejména mangan, titan, zinek nebo nikl, vznikají soustavy siluminů Al-Si-Cu-Mn, Al-Si-Cu-Ti, Al-Si-Cu-Zn a Al-Si-Cu-Ni, což má za následek další zlepšení některých mechanických vlastností. Své uplatnění nacházejí při výrobě tvarově složitých odlitků, jakými jsou skříně spalovacích motorů, převodovky, písty a hlavy válců, řemenice, pouzdra, dnes moderní lité disky kol u automobilů nebo různé součásti na výrobu letadel [31].

- Slitiny Al-Cu

Jako všechny slitiny hliníku obsahující měď, mají i tyto slitiny špatnou odolnost proti korozi, tudíž je namísto jejich povrchová ochrana v podobě čistého hliníku. Při výrobě slitiny Al-Cu se do matriční fáze přidává buďto nikl, nebo železo, které se v roztoku nerozpustí, ale mají za následek zvýšení dlouhodobého tepelného namáhání takovéto slitiny. Její nevýhodou jsou problémy se slévárenskými vlastnostmi při její výrobě, zejména menší zabíhavost taveniny, zvýšený sklon k tvorbě trhlin za tepla při následném tuhnutí a také sklony k mikropórovitosti. Díky vlastnostem této slitiny se výborně hodí na výrobu hlav válců v motoru a na výrobu pístů [31].

- Slitiny Al-Mg

Ze všech slitin hliníku se tyto slitiny vyznačují svou nejvyšší měrnou pevností a rázovou houževnatostí. Uplatnění nacházejí při výrobě rázově namáhaných odlitků nebo odlitků s náhlými změnami průřezů, popř. u odlitků odolávajících prostředí se zvýšenou tvorbou koroze. Jejich předností je lepší obrobitelnost oproti siluminům, naopak jejich nevýhodou jsou horší slévárenské vlastnosti. Přidáním křemíku vzniká slitina Al-Mg-Si, což zvyšuje zabíhavost taveniny a hustotu mající za následek zvýšení jejich měrné hmotnosti, také snižuje sklon k tvorbě trhlin za tepla. Navíc je díky křemíku zvýšena i odolnost slitiny při tepelném namáhání za vyšších teplot, čehož se využívá při výrobě žebrovaných hlav válců nebo při výrobě odlitků odolávajících povětrnostním vlivům. Dalšími aplikacemi slitiny je výroba automobilového kování, vnitřních i vnějších architektonických prvků používaných ve stavebnictví nebo při výrobě hliníkového nádobí [31].

- Slitiny Al-Zn-Mg

Oproti předchozím dvěma zmíněným slitinám se vyznačuje tato slitina lepšími slévárenskými vlastnostmi, lepší odolností proti korozi, ale při napětí má sklon korodovat, což je kompenzováno přidáním 0,8 až 1,2 hm. % železa. Další výhodou může být menší citlivost slitiny na změnu tloušťky stěn odlitků a dobrá svařitelnost. V České republice se však nepoužívají, jelikož nejsou zahrnuty v normě ČSN [31].

- Slitiny Al-Li

Podobně jako u slitiny Al-Li pro tváření i při výrobě této musí být použito ochranné atmosféry. Uplatnění nachází při výrobě hutních polotovarů [31].

2.2.3 CERTAL

Tato slitina byla pro svou dobrou obrobiteľnosť a mechanické vlastnosti zvolena jako materiál pro výrobu součásti těhlice pravého předního kola. CERTAL je obchodní název pro slitinu hliníku pro tváření spadající do podskupiny Al-Zn-Mg-Cu, o které se zmiňuje kapitola 2.2.1. Její označení podle evropské normy je EN AW-7022 neboli slitina AlZn5Mg3Cu. Jedná se o vytvrditelný druh slitiny, kde stav materiálu je zbaven pnutí tvářením a jeho povrch je válcován. Mechanické vlastnosti této slitiny jsou obdobné jako konstrukční nízkolegovaná ocel bez tepelného zpracování. Zvláštními znaky této slitiny jsou velmi dobrá tvarová stálost, velmi vysoká pevnost, velmi dobrá obrobiteľnosť a také velmi dobrá leštitelnost. Polotovary této slitiny jsou dodávány s tepelným zpracováním s označením T6, což dle norem znamená, že stav materiálu je po aplikaci rozpouštěcího žíhání s následným umělým stárnutím (vytvrzením). Polotovary jsou ve formě desek o tloušťkách pohybujících se od 8 do 140 mm. Jelikož polotovar použitý pro výrobu těhlice pravého předního kola má rozměry 256,8 x 162,1 x 42 mm, pak podle výrobce polotovaru bude mít tloušťka 42 mm mechanické vlastnosti odpovídající rozsahu tloušťek 25 až 100 mm, které jsou uvedeny v tabulce 6. Podrobná charakteristika certalu viz příloha 2 [35].

Tab. 6 Mechanické a fyzikální vlastnosti slitiny CERTAL pro rozsah tloušťek 25 – 100 mm [37].

| CERTAL – Mechanické a fyzikální vlastnosti | | |
|---|---------------------------------------|---------|
| Mez pevnosti v tahu R_m | [MPa] | 550 |
| Mez kluzu $R_{p0,2}$ | [MPa] | 495 |
| Tvrdość dle Brinela | [HB] | 165 |
| Tažnosť A_{50} | [%] | 8 |
| Modul pružnosti v tahu E | [GPa] | 72 |
| Hustota ρ | [g.cm ⁻³] | 2,76 |
| Lineární koeficient tepelné roztažnosti α (při teplotě 20-100°C) | [10 ⁻⁶ .K ⁻¹] | 23,6 |
| Tepelná vodivost λ (po vytvrzení) | [W.m ⁻¹ .K ⁻¹] | 120-150 |
| Elektrická vodivost G (po vytvrzení a při teplotě 20°C) | [m/Ω.mm ²] | 18-22 |

2.2.4 Obrobiteľnosť hliníku a hliníkových slitin

Definice obrobiteľnosti je schopnosť materiálu být obráběn. Hliník dle normy ISO 513 rozděluje materiály do 6 skupin (P, M, K, N, S, H) je řazen do skupiny N, což jsou neželezné materiály (značeny zeleným pozadím za písmenem N). Největší zastoupení v této skupině mají slitiny hliníku Al s obsahem křemíku menším než 12 až 13 hm. %. Hliník a jeho slitiny se řadí mezi materiály lépe obrobitelné, než ostatní konstrukční materiály. Měrná řezná síla k_c při procesu obrábění se pohybuje v rozmezí 350 až 700 N/mm², tudíž řezné síly a s nimi související výkon pro obrábění jsou malé. Obrobiteľnosť hliníku se vyznačuje tvorbou dlouhých třísek. U legovaných slitin hliníku je kontrola třísky snadnější. Volbou vhodných řezných podmínek, řezného materiálu nástroje a jeho

geometrie, lze dosáhnout příznivějšího utváření třísky ve formě kratších a lámavějších třísek, jež jsou pro obráběcí proces příznivější. Platí, že s rostoucí řeznou rychlostí se délka třísky zkracuje. Hliník má tendenci ulpívat na břit nástroje eventuálně na čele VBD (v důsledku jeho nízké teploty tavení) a tvořit nárůstky, což vede ke tvorbě otřepů nebo problémům s kvalitou obrobenej plochy, proto je nutné použít ostrých břitů, dále vysokých hodnot řezné rychlosti v_c a vždy používat řeznou kapalinu. Obrábění hliníku a jeho slitin za sucha je problematické i přes jeho nízké mechanické vlastnosti oproti ocelím, protože má vysokou tepelnou vodivost λ , adhezní sklony k břitu nástroje a nízkou teplotu tavení (max. 650°C). Vlivem této vysoké tepelné vodivosti λ společně s vlivem vysoké tepelné roztažnosti α dochází k velkému odvodu tepla z místa řezu do obrobku a tím ke vzniku deformací. Obrábění slitin hliníku pro tváření se dá označit jako dobře obrobitelné. Ve stavu bez tepelného zpracování (nevytvrzené) mají horší obrobitelnost, než tepelně vytvrzené materiály tvořící dlouhou a snadno lámavou třísku, což byl i případ materiálu CERTAL, který se do této skupiny slitin hliníku pro tváření řadí. Při obrábění slitin hliníku pro odlitky je jejich obrobitelnost ovlivněna krystalizací materiálu při jeho výrobě a také obsahem Si. U hliníkových odlitků mohou způsobovat problémy vměstky v podobě zrn písku vzniklých při licím procesu výroby odlitků do forem z písku, např. u bloků motorů. Pro správný průběh obráběcího procesu je nutné volit pozitivní geometrii břitu VBD s ostrým břitem a je doporučováno dodržovat hodnoty h_{ex} (maximální tloušťku třísky) v rozmezí 0,1 až 0,2 mm, poněvadž příliš nízké hodnoty mohou vést ke tvorbě otřepů. S rostoucím obsahem Si stoupá také abrazivní opotřebení nástroje a je vhodné snížit řezné podmínky. Pokud je obsah křemíku Si nižší než 8 hm. %, je vhodné použít karbidových tříd nástrojů, kde by se řezná rychlost v_c měla pohybovat v rozsahu 800 až 2000 m/min. Pokud je obsah křemíku vyšší než 8 hm. %, je vhodné použít nástroje z polykrystalického diamantu PCD, kde by se řezná rychlost měla pohybovat v rozmezí 2500 až 3500 m/min. Použití vyšších řezných rychlostí přispívá ke zvýšení výkonnosti bez negativního vlivu na životnost nástroje. Nadeutektické slitiny hliníku s obsahem křemíku vyšším než 12% jsou velice abrazivní, jelikož obsahují struktury s hrubším zrnem, což má za následek větší abrazi a následné opotřebení nástroje. Hliník má tendenci k nalepování na nástroj, pokud je obráběno standartními řeznými nástroji ze SK. Tato tendence stoupá s rostoucí zrnitostí wolframkarbidu (WC), obsahem kobaltu Co a s rostoucí drsností řezné hrany a povrchu řezného nástroje. Zvýšením některého z těchto parametrů povede ke zvýšení lepidlosti obráběného materiálu z hliníku nebo jeho slitin na nástroj. Toto se kompenzuje povrchovou úpravou nástrojů diamantovým mikroleštěním nebo aplikací ochranných vrstev s nízkým koeficientem tření (vrstvy s TiB_2 , MoS_2 nebo DLC vrstvy), čímž se sníží drsnost nástroje a tím i adhezní sklon. Obdobný antiadhezní účinek poskytují diamantové povlaky nebo polykrystalický diamant [38, 39, 40].

2.2.5 Tepelné zpracování slitin hliníku

Mezi nejčastější tepelné zpracování hliníku se řadí rekrytalizační žihání a mezi hlavní způsoby tepelného zpracování slitin hliníku se řadí žihání a vytvrzování. Hlavními typy žihacího procesu jsou následující [31].

- Žihání na odstranění pnutí

Provádí se za účelem odstranění napětí ve slitinách tvářených za tepla a u odlitků litých do kovové formy nebo u tvarově složitých odlitků, popř. po svařování. Proces odstranění pnutí probíhá už za teplot kolem 200°C, větší účinnosti se dosáhne ale až při teplotách od 300 do 400°C [31].

- Rekrystalizační žihání

Tento typ žihacího procesu bývá často zařazován jako meziproces tepelného zpracování po tváření za studena. V případě požadavku na pevnost a zároveň i tvárnost materiálu, může být toto tepelné zpracování považováno za konečné. Teplota rekrystalizačního žihání se pohybuje v rozmezí 300 až 400°C [31].

- Homogenizační žihání

Své uplatnění nalézá před samotným procesem tváření k odstranění dendritických struktur. Následkem toho dochází ke zvýšení homogenity a snížení heterogenity materiálu před tvářením [31].

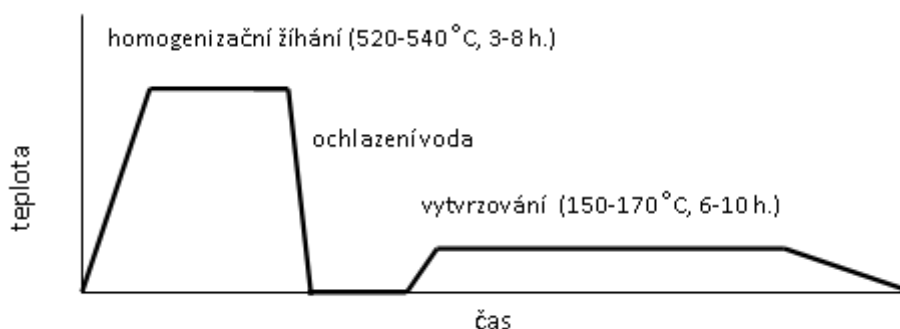
- Žihání vytvrzených slitin

Slouží pro snížení pevnosti u vytvrzených materiálů, jsou-li určeny k dalším tvářecím operacím. Teplota, kdy se odpevnění vytvrzeného materiálu snižuje, se pohybuje kolem 350°C [31].

- Vytvrzování

Tepelným zpracováním vytvrzováním se dosahuje podstatného zvýšení meze kluzu R_m , smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ a tvrdosti, zatímco tažnost A se snižuje. Výchozím polotovarem pro vytvrzovací proces je odlitek, který obvyklým způsobem ztuhl ve formě. Proces vytvrzování se skládá z několika etap (viz obr. 29) [30, 31]:

- rozpouštěcího homogenizačního žihání (obvykle při teplotách 520 až 540°C po dobu 3 až 8 hodin),
- následného rychlého ochlazení ve vodě,
- precipitačního vytvrzování a to buď:
 - za tepla – při teplotách 150 až 170°C po dobu 6 až 10 hodin (slitiny hliníku s obsahem hořčíku),
 - za studena – při běžné teplotě okolí, kdy je odlitek uskladněn po dobu 1 až 2 týdnů.

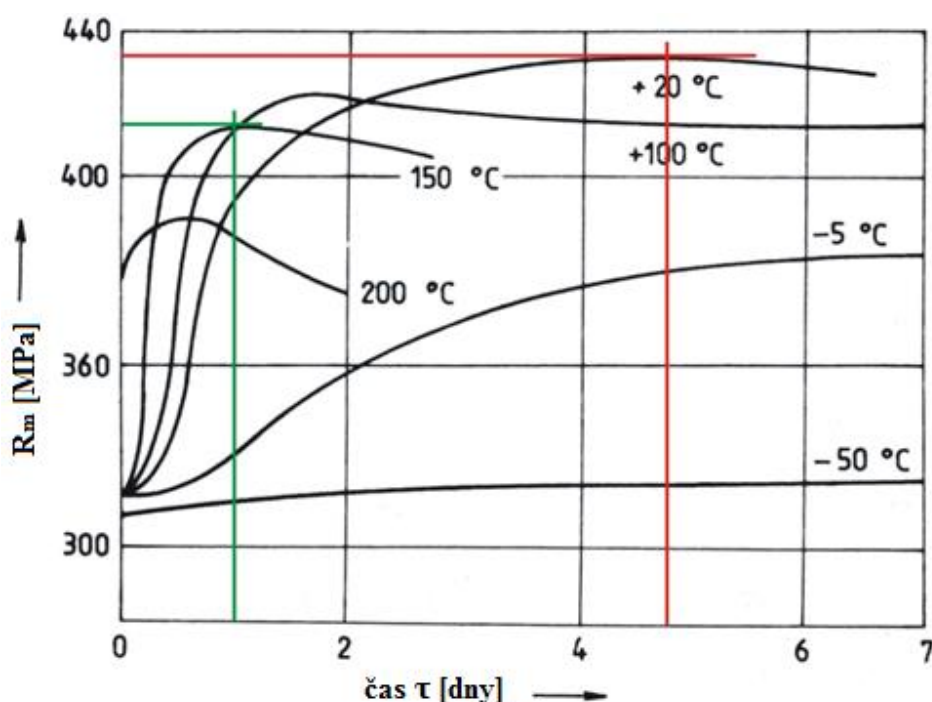


Obr. 29 Diagram tepelného zpracování s vytvrzováním za tepla [30].

Minimální potřebná rychlost ochlazování z teploty rozpouštěcího ohřevu je dána kritickou rychlostí ochlazování, která se stanoví z kinetických diagramů rozpadu nerovnovážného tuhého roztoku α . Jako ochlazovací médium se téměř vždy používá voda o teplotě 20 až 40°C. U tenkostěnných součástí se může dosáhnout

rychlosti ochlazování 600 až 800°C za sekundu, což je mnohonásobně vyšší rychlost, než je kritická rychlost ochlazování jakékoliv slitiny hliníku. Vzniklý metastabilní tuhý roztok α je tvařitelný bez nebezpečí vzniku prasklin oproti výchozímu stavu slitiny. Proces vytvrzování (stárnutí) vyjadřuje rozpad přesyceného tuhého roztoku α , což se projevuje růstem tvrdosti a pevnosti za současného snížení tvárnosti. U některých slitin probíhá proces stárnutí samovolně (při pokojové teplotě) nebo uměle (umělé stárnutí za zvýšených teplot) [31].

Na obr. 30 je ukázka diagramu vytvrzování (stárnutí) slitiny hliníku AlCu4Mg1, kde červenou barvou je splněna podmínka stárnutí z hlediska ekonomicky nejlevnější varianty (rozpuštěcí žíhání při teplotách 490 až 505°C, chlazení vodou, přirozené stárnutí za teploty 20°C po dobu 115 hodin, výsledná mez pevnosti $R_m = 432$ MPa) a z hlediska dražší, ale rychlejší varianty (rozpuštěcí žíhání 490 až 505°C, chlazení vodou, umělé stárnutí za teploty 150°C po dobu 25 hodin, výsledná mez pevnosti $R_m = 415$ MPa [32, 34].



Obr. 30 Diagram stárnutí slitiny hliníku AlCu4Mg1 pro variantu umělého stárnutí (zelená barva), pro variantu přirozeného stárnutí (červená barva) [32, 34].

2.2.6 Označování slitin hliníku

Označování hliníku a jeho slitin se řídí dle technických norem. V České republice existují dva způsoby označování slitin hliníku, a to podle normy ČSN a podle normy EN, přičemž platí, že v rámci sjednocování trhu v Evropě je prioritní označovat slitiny dle EN normy a až poté dle ČSN normy do závorky. Některé slitiny dle české ČSN normy nemusí mít odpovídající ekvivalent v rámci EN normy a naopak. Metodika označování neželezných kovů a slitin dle EN používá dva způsoby označování [31]:

- 1. způsob** – pro znak je převzat z dlouhodobě zavedeného a všeobecně přijatého principu dle ISO: znak kovu či slitiny sestávající z chemických značek prvků a čísel označujících jejich směrný obsah v hmotnostních % (např. dural má podle tohoto způsobu označení EN AW-AlCu4Mg1) [31],

2. **způsob** – znakem kovu či slitiny je několikamístný kód sestávající z velkých písmen a číslic, jejichž významy se liší v závislosti na materiálové skupině, např. u slitin hliníku rozlišováno zda se jedná o slitiny pro tváření nebo o slitiny pro odlitky (např. dural má podle tohoto způsobu označení EN AW-2024) [31].

Tento 2. způsob označování bude popsán níže v tabulce 7.

Tab. 7 Význam písmen a číslic dle 2. způsobu označování slitin hliníku [31, 41].

| Slitiny hliníku pro tváření | | Slitiny hliníku pro odlitky | |
|--|------------------------|--|------------------------|
| EN AW-XXXX | | EN AC-XXXXX | |
| <u>Písmena:</u> | | | |
| <ul style="list-style-type: none">• První dvě písmena jsou v případě, že se jedná o slitinu, označena EN.• Další dvě písmena znamenají: 1. písmeno je u všech slitin hliníku A (tvářené i pro odlitky) a značí, že se jedná o hliník, 2. písmeno [u slitin hliníku pro tváření značeno vždy W, u slitin hliníku pro odlitky se značení určí, zda jde o (B = ingot, C = odlitek, M = předslitina)]. | | | |
| <u>Číslice:</u> | | | |
| <p>➤ <i>U tvářených slitin:</i></p> <ul style="list-style-type: none">▪ 1. číslice (viz tabulka) – označuje hlavní přísadový prvek,▪ první dvojčíslí – 10XX ve skupině slitin 1XXX označuje nelegovaný hliník, poslední dvojčíslí obsah příměsových prvků v desetinách procenta,▪ 2. číslice (viz tabulka) – ve znaku skupin slitiny 2XXX až 8XXX určuje modifikaci slitiny (je-li druhá číslice ve znaku 0 = základní slitina bez modifikace, je-li 1 až 9 – označuje její modifikaci),▪ 3. a 4. číslice – ve znaku skupin slitiny 2XXX až 8XXX nemají specifický význam, slouží pouze k rozlišení slitin dané skupiny. <p>➤ <i>U slitin pro odlitky:</i></p> <ul style="list-style-type: none">▪ 1. číslice (viz tabulka) – označuje hlavní přísadový prvek,▪ 2. číslice (viz tabulka) – upřesňuje skupinu slitin,▪ 3. číslice – rozlišuje slitiny dané skupiny, jejichž rozdíly v chemickém složení jsou minimální,▪ 4. číslice – je všeobecně 0,▪ 5. číslice – je vždy 0, kromě slitin určených pro výrobu leteckých komponent. | | | |
| Význam 1. číslice ve znaku tvářených slitin Al | | Význam 1. číslice ve znaku slitin Al pro odlitky | |
| Skupina slitin | Hlavní přísadové prvky | Skupina slitin | Hlavní přísadové prvky |
| 1XXX | Al technické čistoty | | |
| 2XXX | Cu | - | - |
| 3XXX | Mn | 2XXXX | Cu |
| 4XXX | Si | - | - |
| 5XXX | Mg | 4XXXX | Si |
| 6XXX | Si, Mg | 5XXXX | Mg |
| 7XXX | Zn | - | - |
| 8XXX | jiné prvky, např. Li | 7XXXX | Zn |
| 9XXX | dosud neobsazeno | | |

| Význam 2. číslice ve znaku tvářených slitin Al | | Význam 2. číslice ve znaku slitin Al pro odlitky | |
|--|---|--|------------------------|
| Skupina slitin | Modifikace slitiny | Skupina slitin | Hlavní přísadové prvky |
| 1XXX | Změny v mezním obsahu doprovodných prvků (0 – nelegovaný hliník s běžným obsahem doprovodných prvků, 1 až 9 – určují zvláštní regulaci obsahu doprovodných nebo slitinových prvků). | 21XXX | AlCu |
| 2XXX | Modifikace dané slitiny (0 – základní slitina, 1 až 9 – modifikace základní slitiny). | 41XXX | AlSiMgTi |
| 3XXX | | 42XXX | AlSi7Mg |
| 4XXX | | 43XXX | AlSi10Mg |
| 5XXX | | 44XXX | AlSi9-12 |
| 6XXX | | 45XXX | AlSi5Cu |
| 7XXX | | 46XXX | AlSi6-11Cu |
| 8XXX | | 47XXX | AlSi12(Cu) |
| 9XXX | - | 48XXX | AlSi12CuNiMg |
| | | 51XXX | AlMg |
| | | 71XXX | AlZnMg |

V případě předslitin (EN AM-XXXXX) u slitin hliníku pro odlitky je první číslicí 9, druhá a třetí číslice představují atomové číslo hlavního přísadového prvku, čtvrtá a pátá jsou pořadová čísla slitin. Označuje-li pátá číslice sudé číslo, jde o předslitinu s nízkým obsahem nečistot, označuje-li liché číslo, jde o předslitinu s vysokým obsahem nečistot [31].

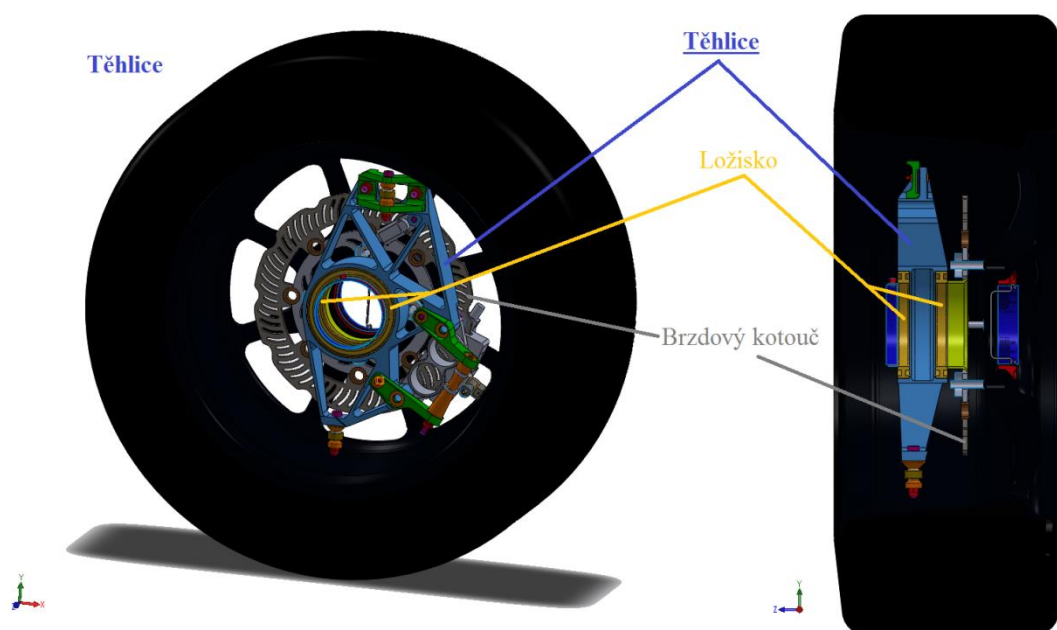
3 KONSTRUKCE PROTOTYPU TĚHLICE PŘEDNÍHO PRAVÉHO KOLA A NÁVRH FRÉZOVACÍCH STRATEGIÍ

V této kapitole se diplomová práce skládá z popisu pracovního prostředí CAD programu SolidWorks, následuje proces konstrukce těhlice předního kola v tomto programu, který byl řešen společně se členy týmu TU Brno Racing v rámci vývoje nového závodního vozu Dragon 4 (obr. 33) s nimiž byla provedena také simulace zatěžování těhlice (není předmětem této práce), dále následuje popis pracovního prostředí CAM programu PowerMILL 2010. V poslední části této kapitoly je proveden návrh frézovacích strategií, ze kterého byl vytvořen NC program, který byl nahrán do CNC stroje, kde byl fyzicky vyroben prototyp těhlice (obr. 31).

Těhlice je součástka v nápravě kola, která slouží k lepšímu přitlaku a stabilizaci kola při průjezdu zatáčkami. V sestavě přední nápravy kola (obr. 32) je uchycena na čepu (na obrázku není znázorněn), uvnitř těhlice je vybrání pro uložení ložisek.



Obr. 31 Součást těhlice pravého předního kola.



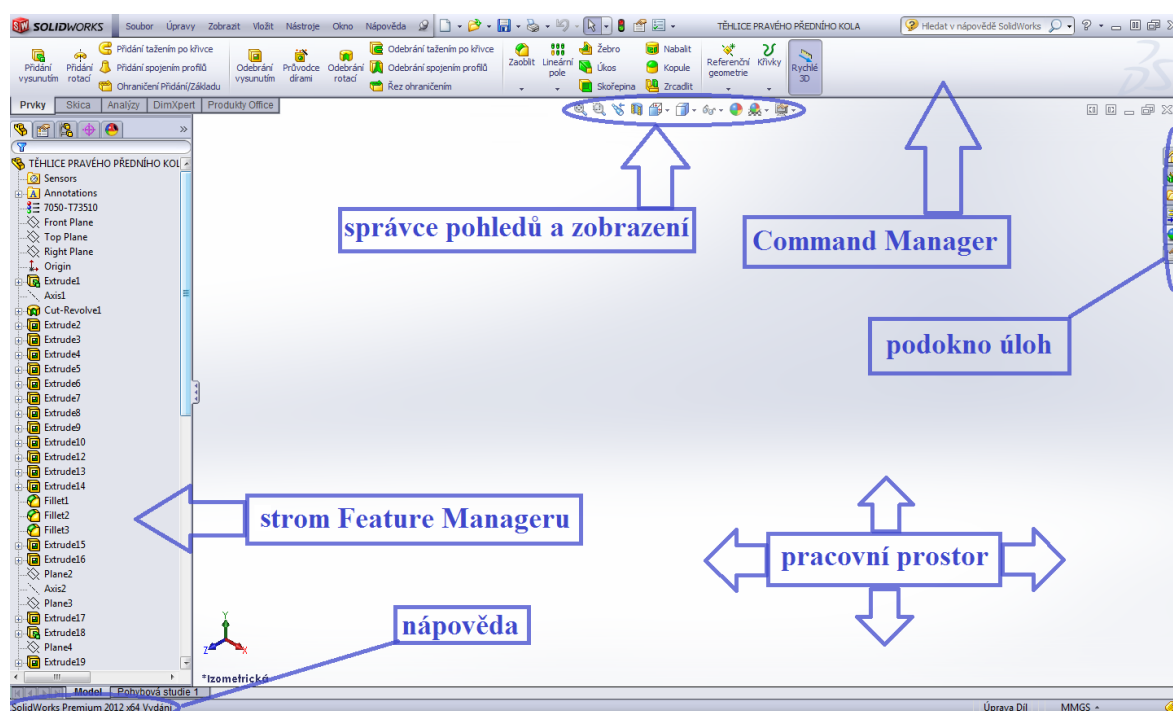
Obr. 32 Zařazení těhlice v sestavě nápravy předního pravého kola a pohled v řezu [42].



Obr. 33 Render vozu studentské formule Dragon 4 týmu TU Brno Racing [42].

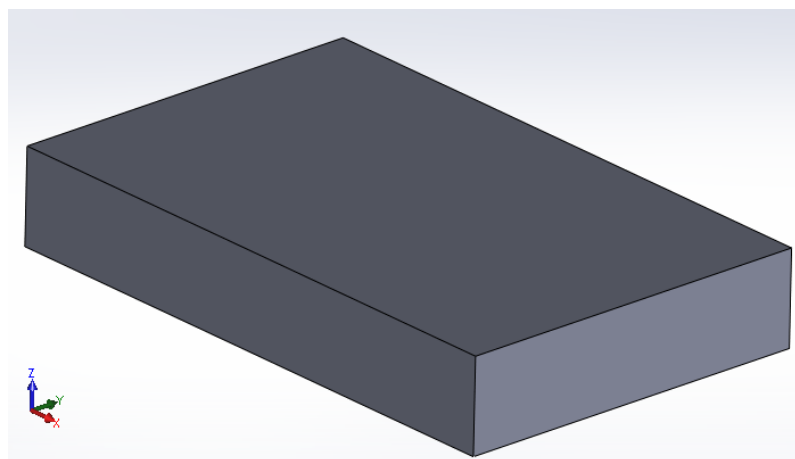
3.1 Konstrukce těhlice předního pravého kola v CAD softwaru SolidWorks

K návrhu a konstrukci byl použit parametrický CAD software SolidWorks 2012. Nejprve byl vytvořen 3D model těhlice a následně z něj také výkres, jenž je přiložen jako příloha 1. Na obr. 34 je vyobrazeno základní uživatelské rozhraní programu SolidWorks 2012.



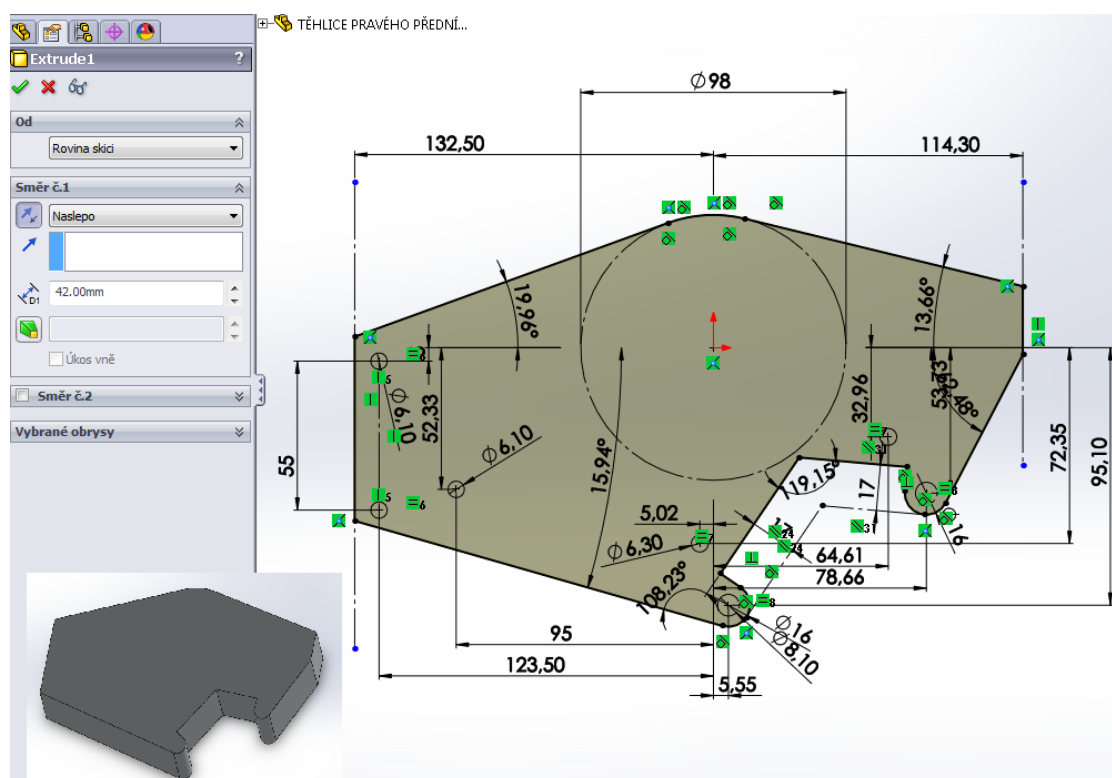
Obr. 34 Uživatelské rozhraní parametrického CAD softwaru SolidWorks 2012.

Souřadný systém při konstrukci těhlice byl zvolen shodně se souřadným systémem pro upnutí polotovaru typu kvádrů mm do svěráku stroje (viz obr. 35), čili svislá osa Z je shodná s osou Z vřetena CNC frézovacího centra, na kterém bude vyráběna. Postup konstruování modelu těhlice je popsán v následujících krocích. Jelikož jde o složitou součást, budou některé kroky přeskočeny a budou zde sepsány jen ty nejhlavnější. Kóty a úhly jsou pouze orientační, jelikož se tento 3D model vloží přes import modelu do CAM programu PowerMILL, z něhož se vygenerují frézovací strategie, následně je automaticky vygenerován NC program, který byl nahrán do CNC frézovacího centra, jenž tento 3D model vyrobí.



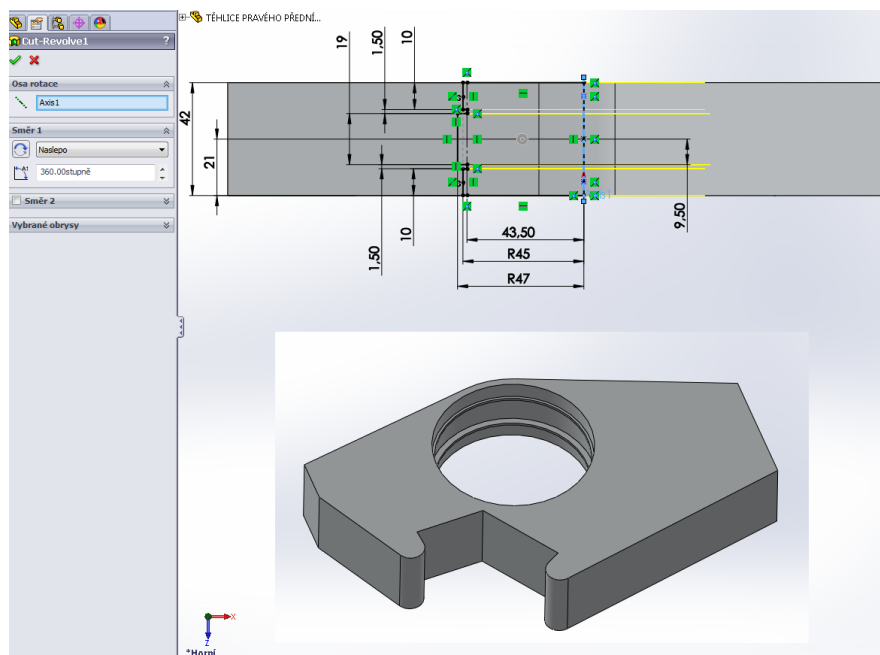
Obr. 35 Výchozí polotovar pro výrobu prototypu těhlice předního pravého kola.

Operací 1 bylo vysunutí základního obrysu z náčrtu ve směru osy Z o 42 mm, čímž vznikl základní tvar těla (viz obr. 36).



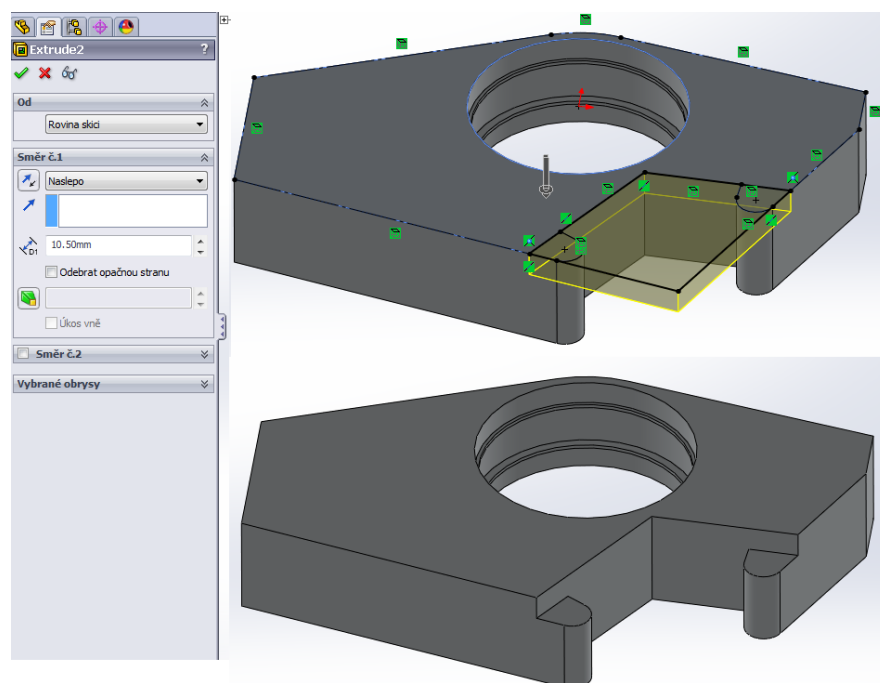
Obr. 36 Vysunutí základního obrysu součásti.

Operací 2 (viz obr. 37) bylo odebrání rotací o 360° průměru 94 mm a průměru 90 mm na otvor pro čep a pro budoucí umístění ložisek, pro která musí být při výrobě dodržena tolerance N7 ($89,9725 \pm 0,0175$), drsnost povrchu $Ra = 0,8 \mu\text{m}$ a také geometrická tolerance soustřednosti a souososti oproti základně umístěné na vyfrézované ploše. Geometrická tolerance souososti a soustřednosti by se měla pohybovat kolem hodnoty 0,05 mm.



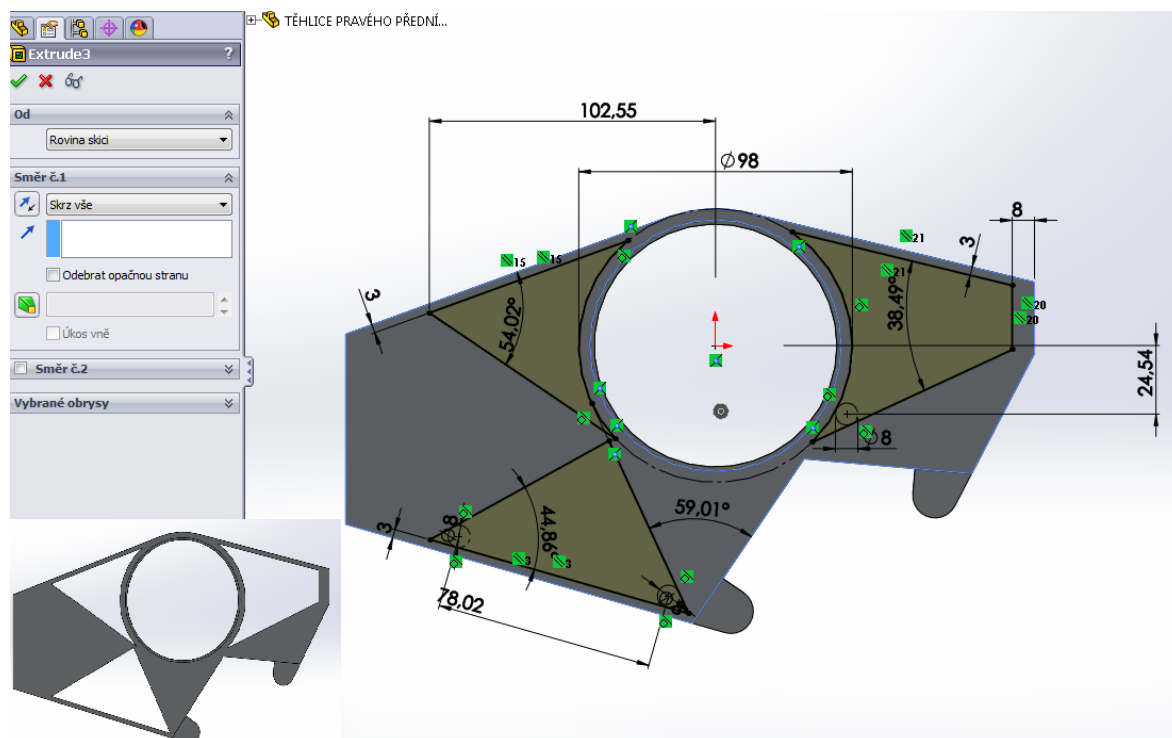
Obr. 37 Otvor pro umístění ložisek a čepu.

Operací 3 bylo (viz obr. 38) odebrání vysunutím o vzdálenost 10,5 mm pro vznik ploch k budoucímu vyvrtání dvou děr o průměru $8,1 \pm 0,1 \text{ mm}$.



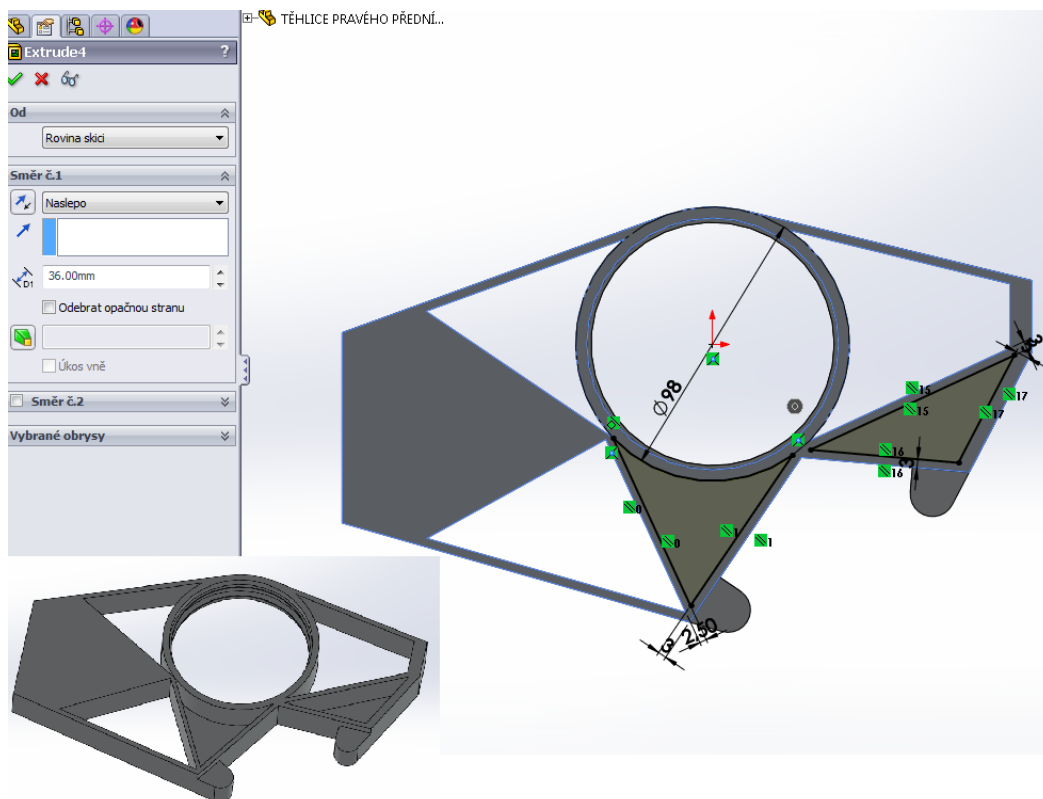
Obr. 38 Plochy pro budoucí vyvrtání děr.

Operací 4 (viz obr. 39) bylo odebrání vysunutím skrze vše pro vznik tří vybrání.



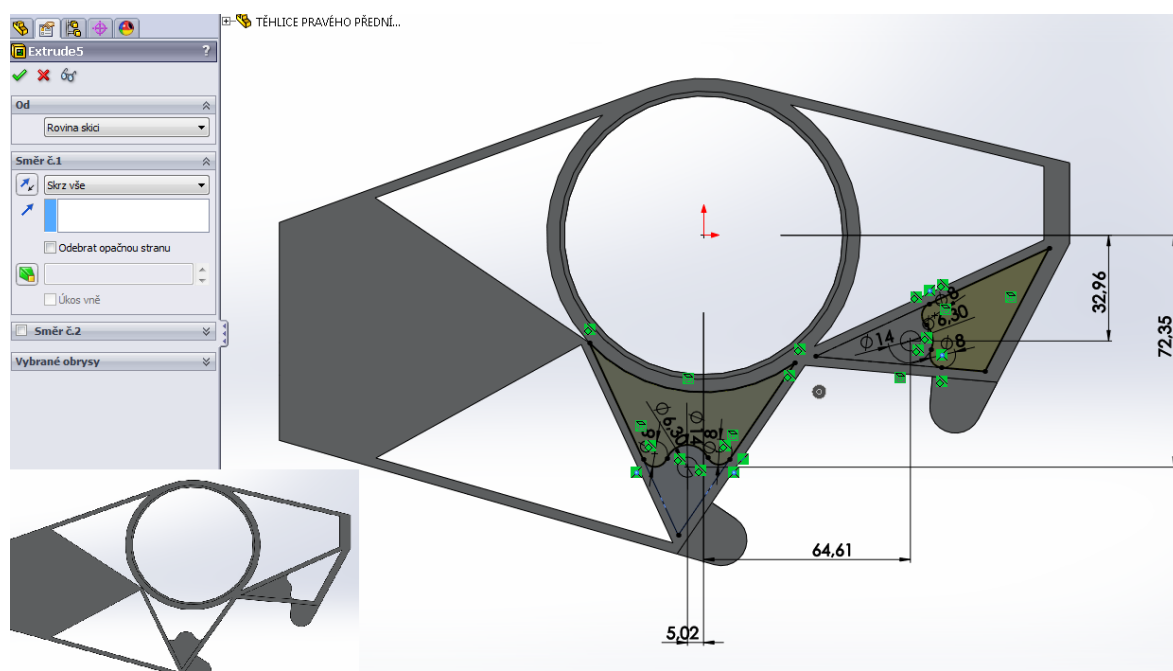
Obr. 39 Odebrání materiálu vysunutím.

Operací 5 (viz obr. 40) bylo odebrání vysunutím o 36 mm pro vznik dalších dvou kapes, jež budou sloužit jako plochy pro umístění děr o průměru 6,3 mm.



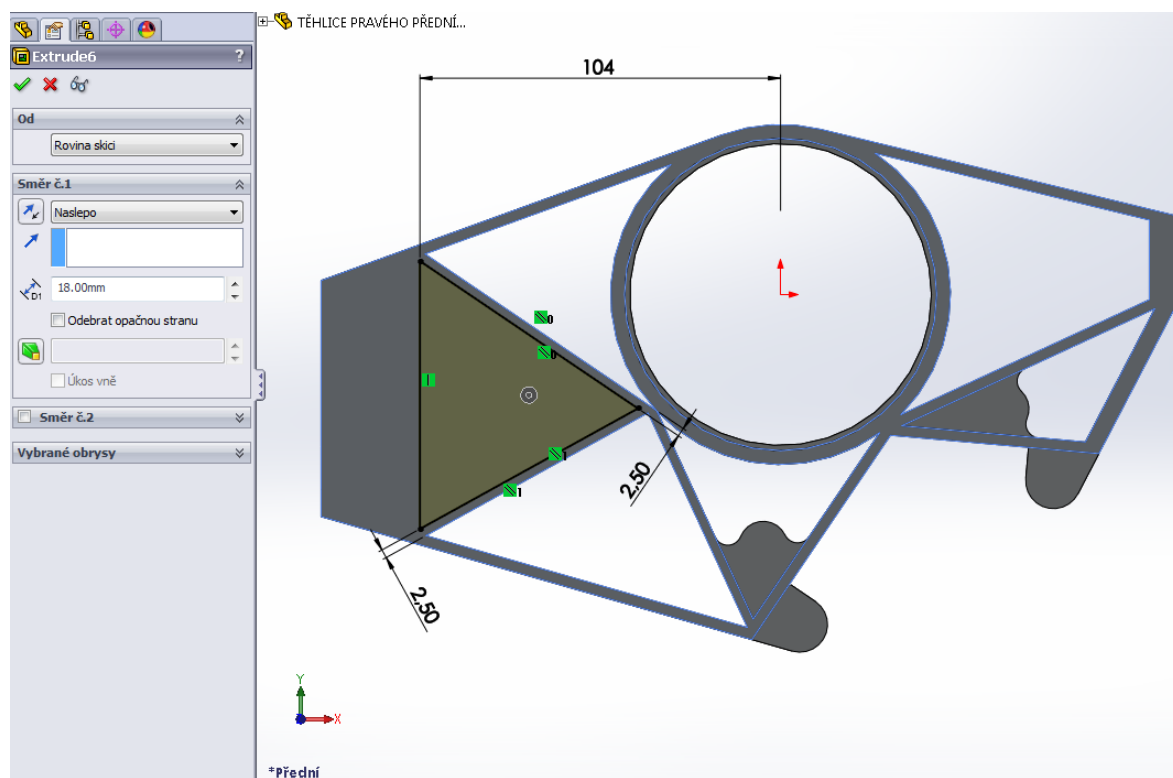
Obr. 40 Vznik budoucích ploch pro díry.

Operací 6 (viz obr. 41) bylo odebrání vysunutím skrze vše, které vytvoří finální tvar ploch pro umístění děr.



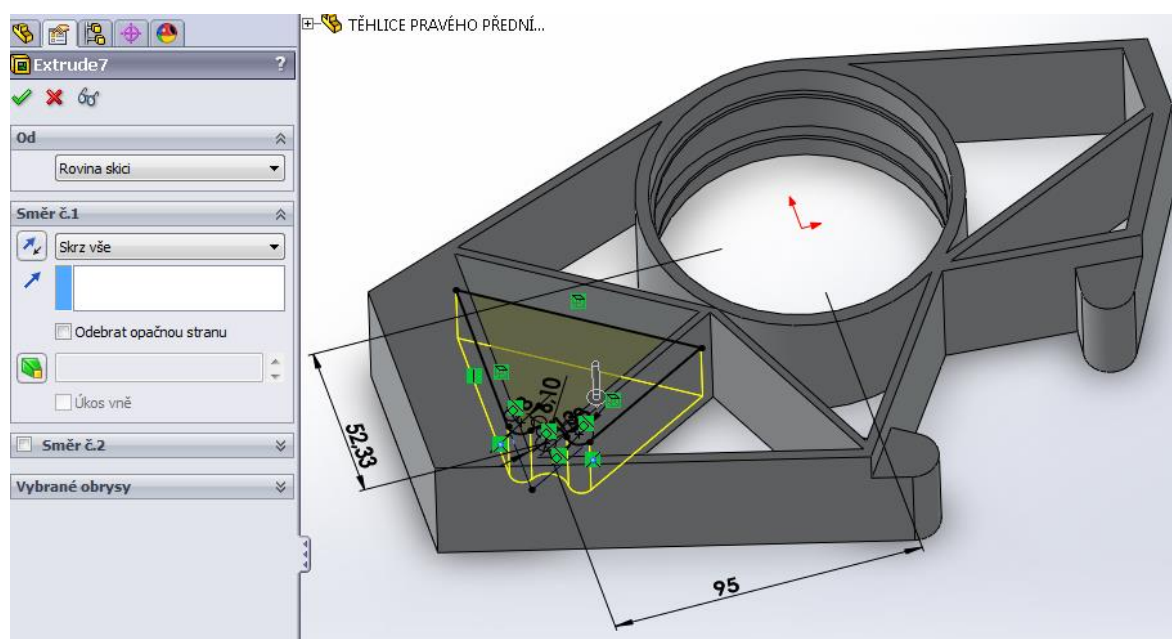
Obr. 41 Vznik ploch pro umístění děr.

Operací 7 (viz obr. 42) bylo odebrání vysunutím o 18 mm pro vznik další plochy k budoucímu umístění díry o průměru 6,1 mm.



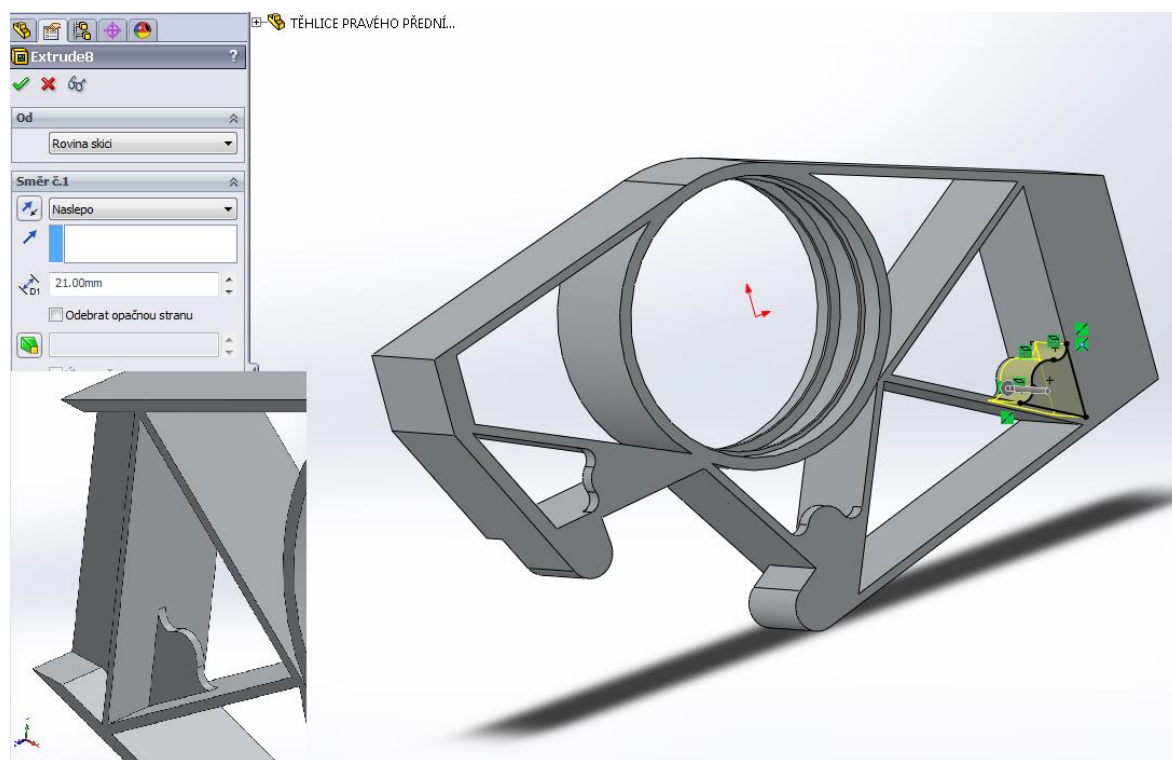
Obr. 42 Vznik další budoucí plochy pro díru.

Operací 8 (viz obr. 43) bylo odebrání vysunutím skrze vše, čímž vznikne finální tvar plochy pro umístění díry o průměru 6,1 mm.



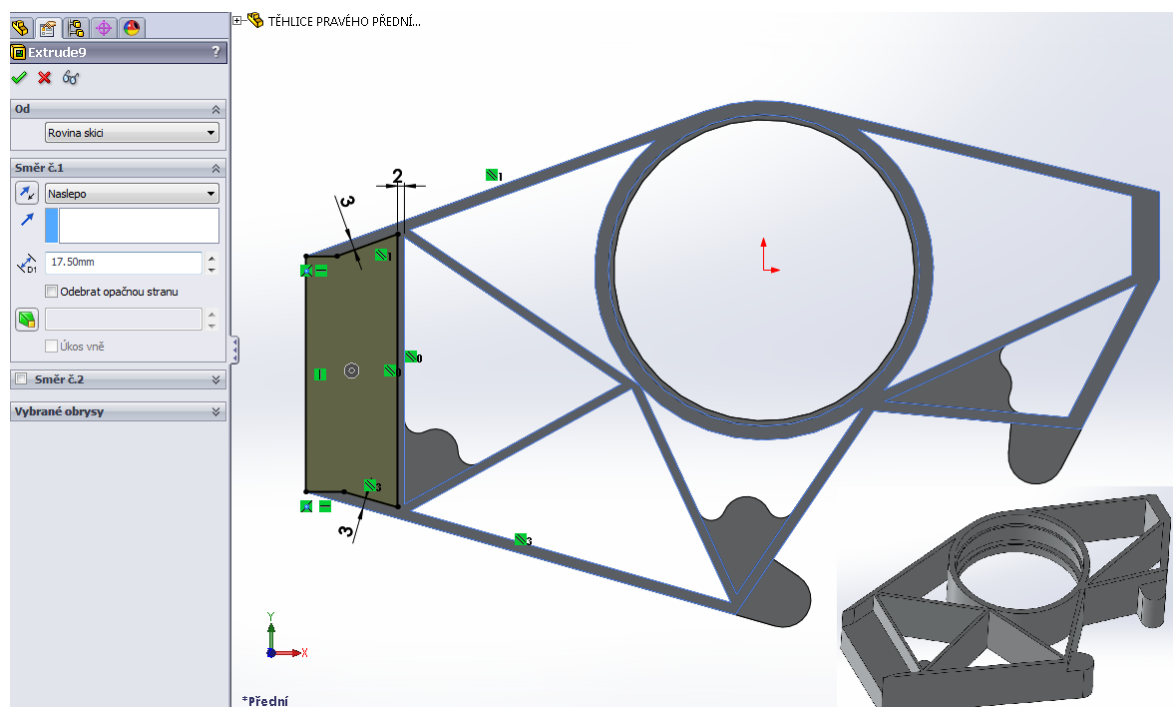
Obr. 43 Finální tvar plochy pro díru.

Operací 9 (viz obr. 44) bylo odebrání vysunutím o 21 mm, ale z opačné strany, čímž vznikne finální tvar plošiny o tloušťce 3 mm pro umístění díry o průměru 6,1 mm.



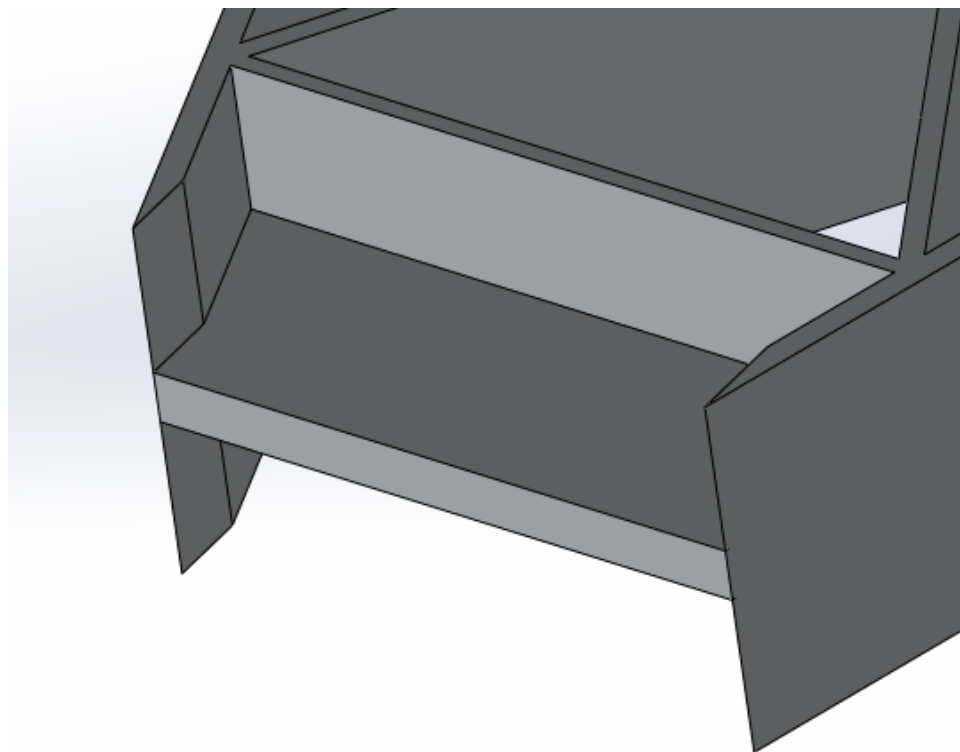
Obr. 44 Finální tvar plošiny pro budoucí díru.

Operací 10 (viz obr. 45) bylo odebrání vysunutím o 17,5 mm, čímž vznikne budoucí plošina pro umístění dvou děr o průměru 6,1 mm.



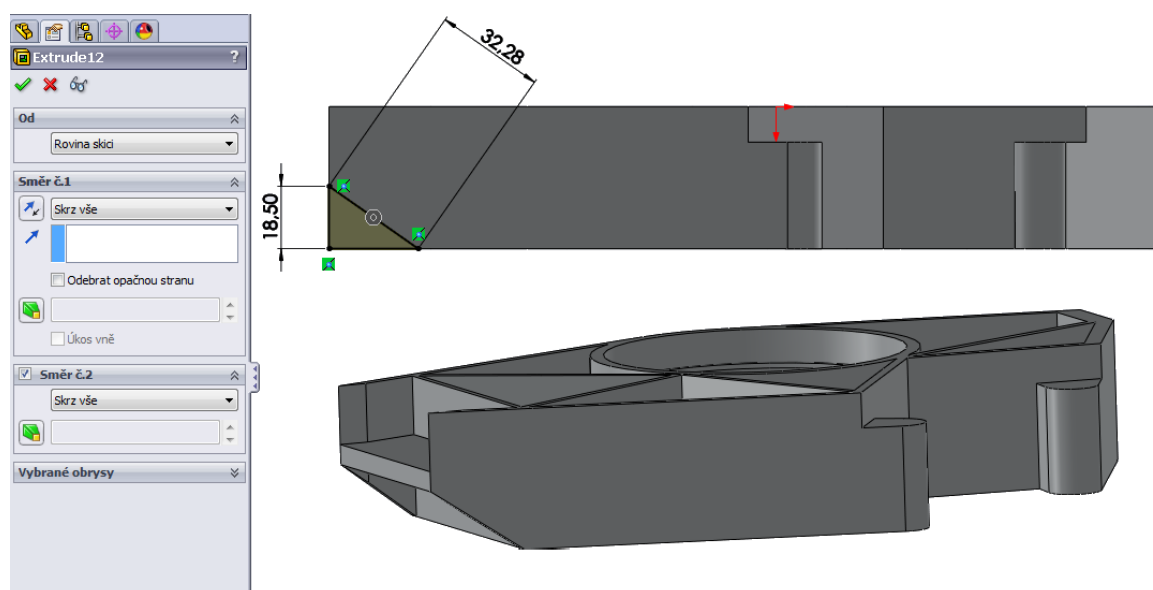
Obr. 45 Budoucí plocha plošiny.

Operací 11 (viz obr. 46) bylo odebrání vysunutím o vzdálenost 18,5 mm, náčrt byl použit stejný jako u operace 10, čímž vznikne plošina o tloušťce 6 mm.



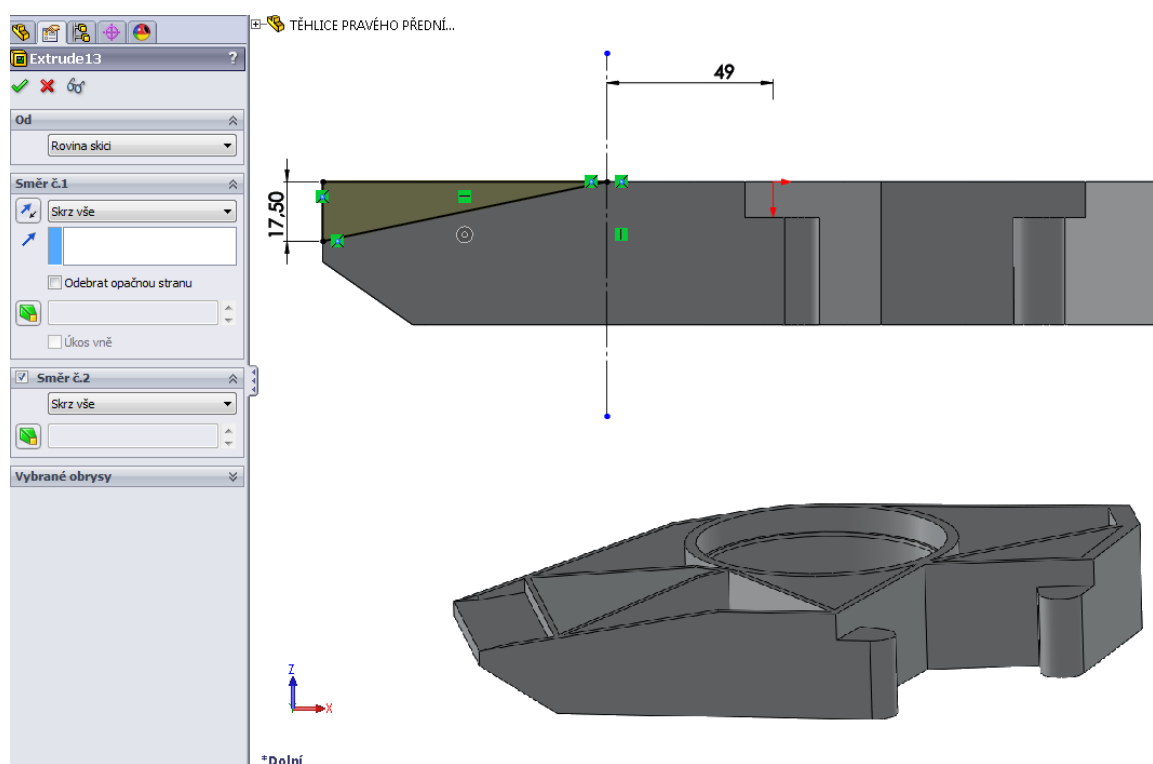
Obr. 46 Vznik plošiny.

Operací 12 (viz obr. 47) bylo odebrání vysunutím skrze vše, čímž vznikne zkosení levé části těhlice.



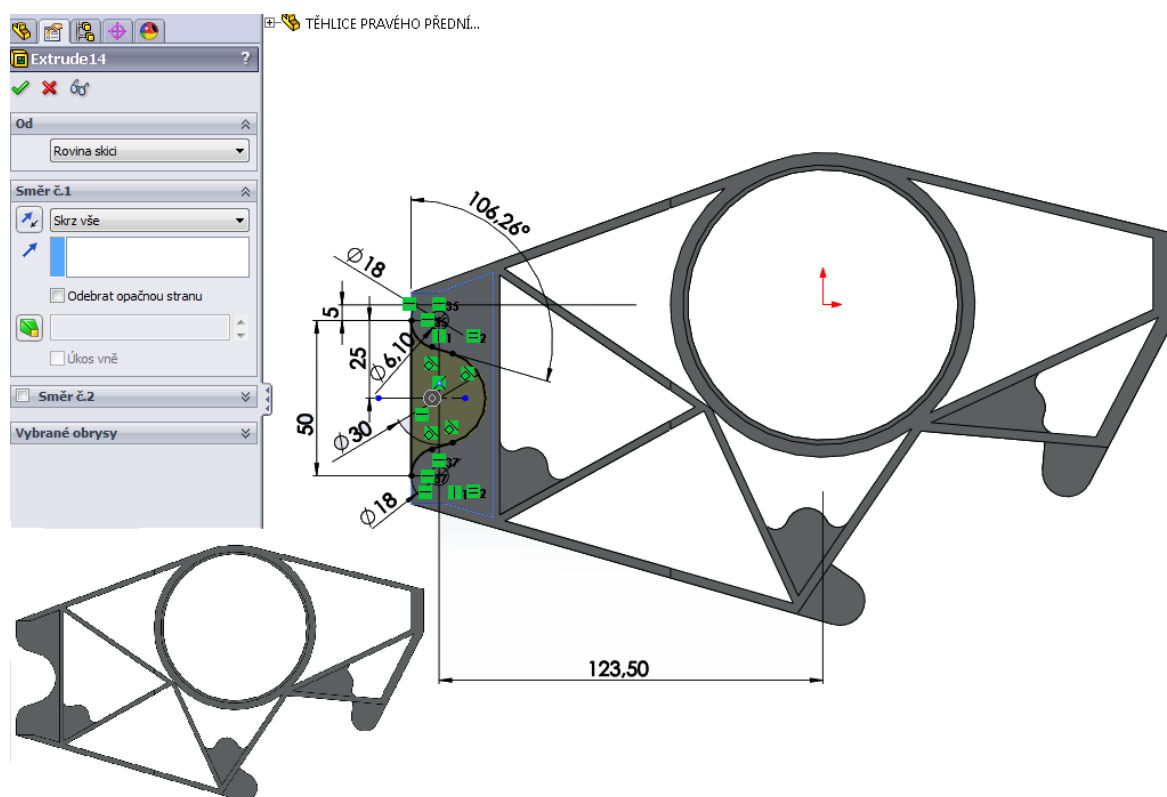
Obr. 47 Zkosené levé strany těhlice.

Operací 13 (viz obr. 48) bylo odebrání vysunutím skrze vše, čímž je vytvořeno další zkosení levé části těhlice.



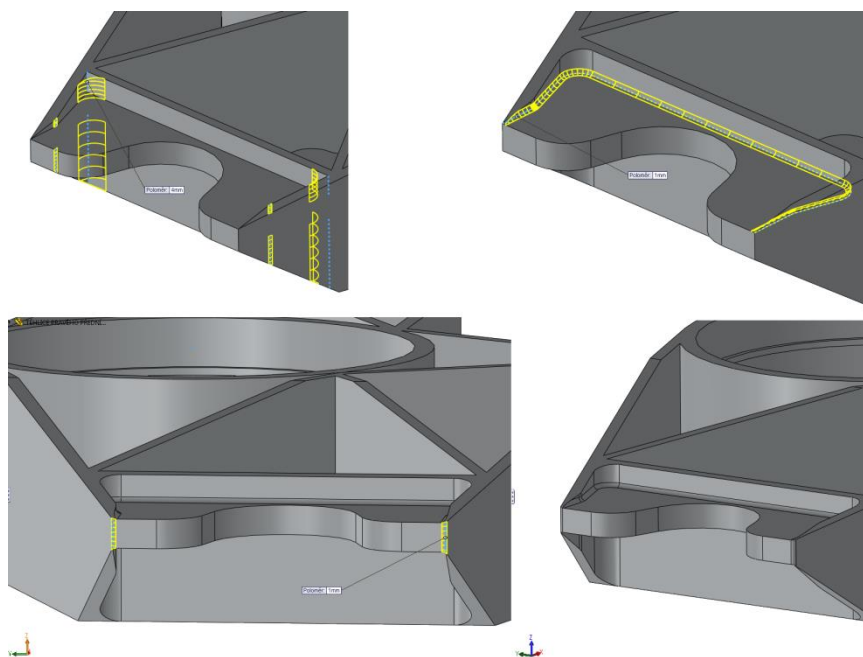
Obr. 48 Vznik druhého levého zkosení.

Operací 14 (viz obr. 49) bylo odebrání vysunutím skrze vše, čímž vznikne finální tvar plošiny pro umístění děr o průměru 6,1 mm.



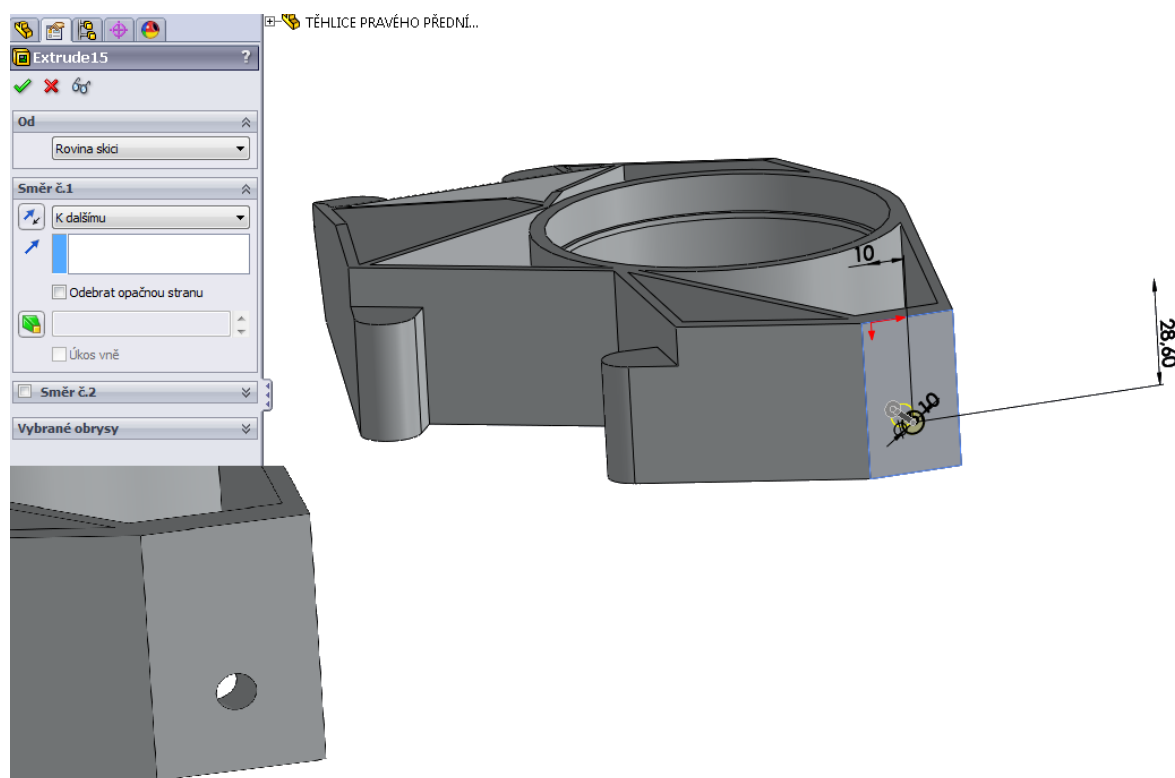
Obr. 49 Finální tvar plošiny.

Operacemi 15, 16 a 17 (viz obr. 50) bylo vertikální zaoblení hran poloměry R4 (levý horní), R1 (levý dolní) a horizontální R1 (horní pravý). Tím vznikla výsledná podoba plošiny (dolní pravý).



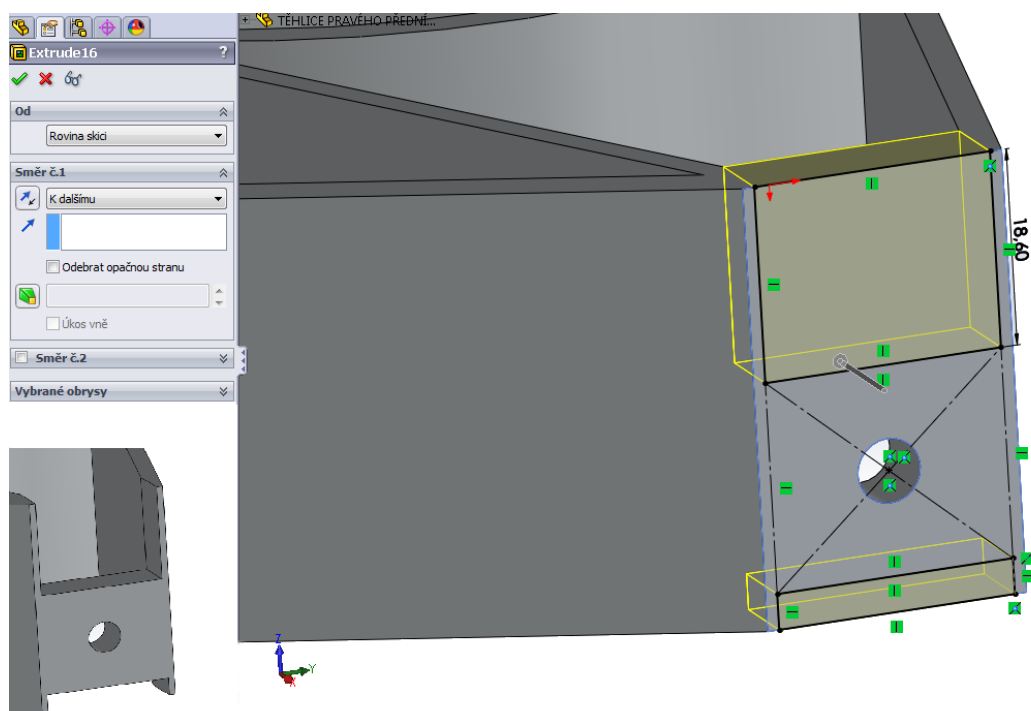
Obr. 50 Jednotlivá zaoblení a jejich dopad na výslednou podobu plošiny.

Operací 18 (viz obr. 51) bylo odebrání vysunutím k další ploše, než ze které vychází skica, čímž vznikla na pravé straně těhlice díra o průměru 6,1 mm.



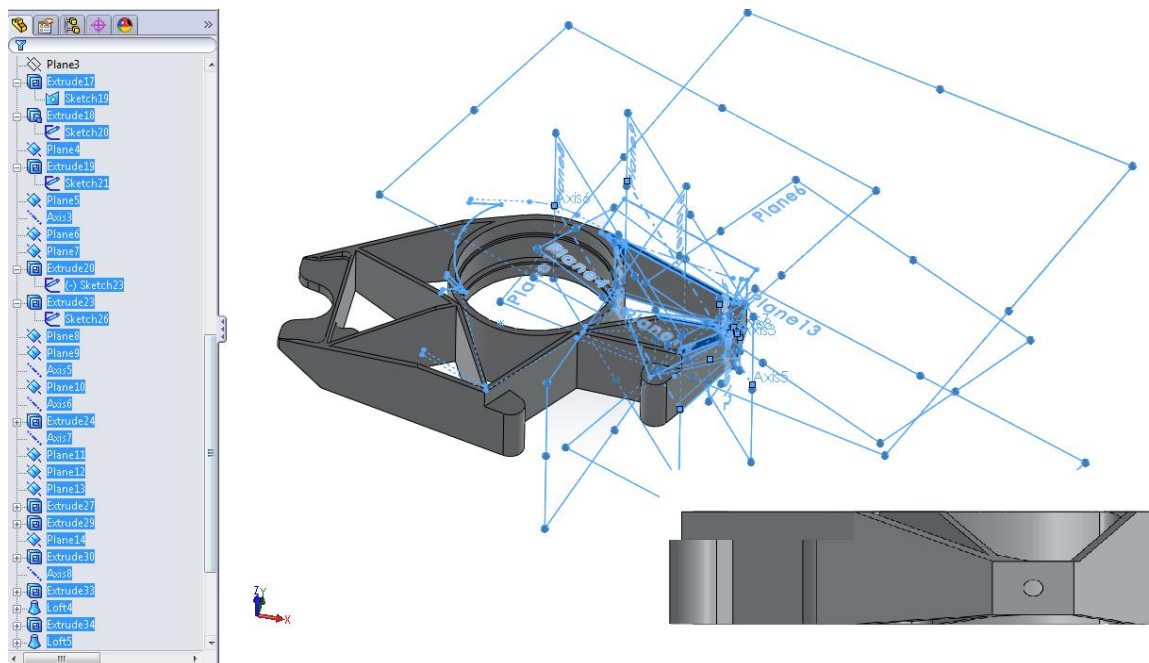
Obr. 51 Vznik díry průměru 6,1 mm.

Operací 19 (viz obr. 52) bylo odebrání vysunutím k dalšímu obdobně jako u operace 18, čímž vznikl základ pro pozdější odebrání bočních stran pod sklopenými rovinami.



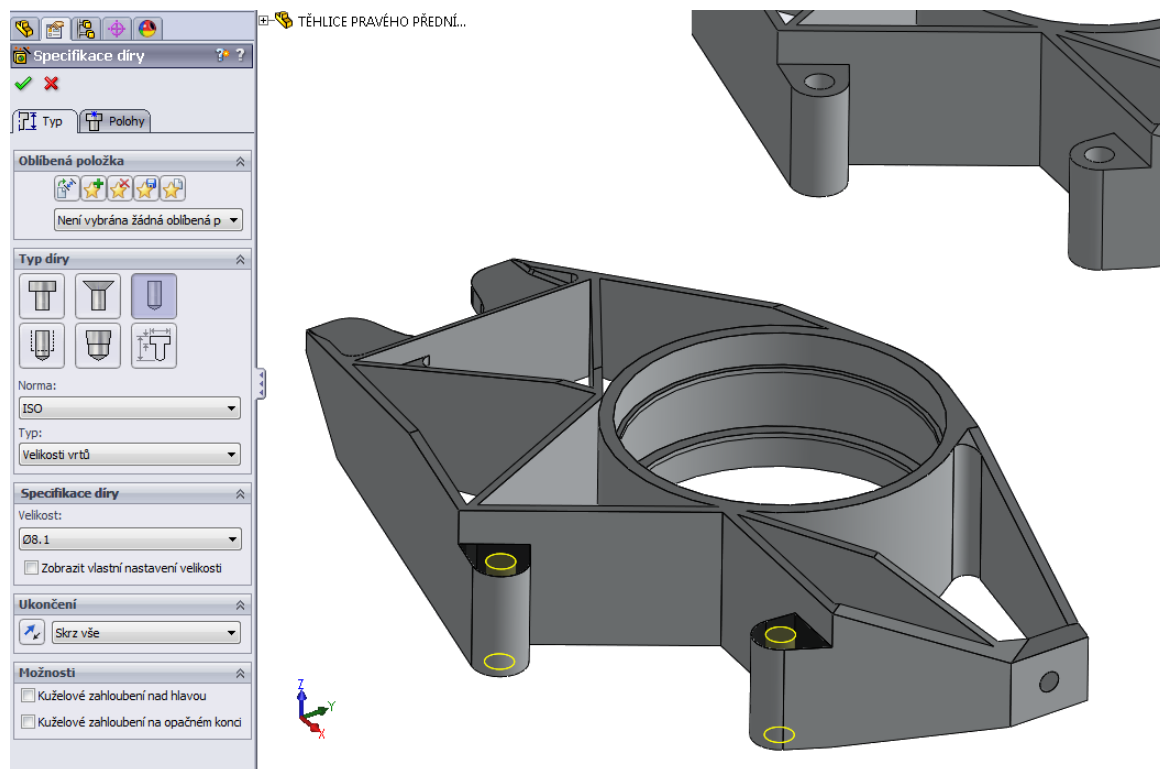
Obr. 52 Základ pro pozdější odebrání pod sklopenými rovinami.

Operací 20 (viz obr. 53) byla tvorba zešikmení, jež byla časově nejnáročnější. Bylo zapotřebí použít spoustu referenčních rovin a os k vytvoření pracovních rovin, na základě nichž byly získány pracovní roviny potřebné k vytvoření skic, ze kterých bylo pomocí odebrání vysunutím dosaženo výsledného tvaru pravé strany těhlice (bez zaoblení).



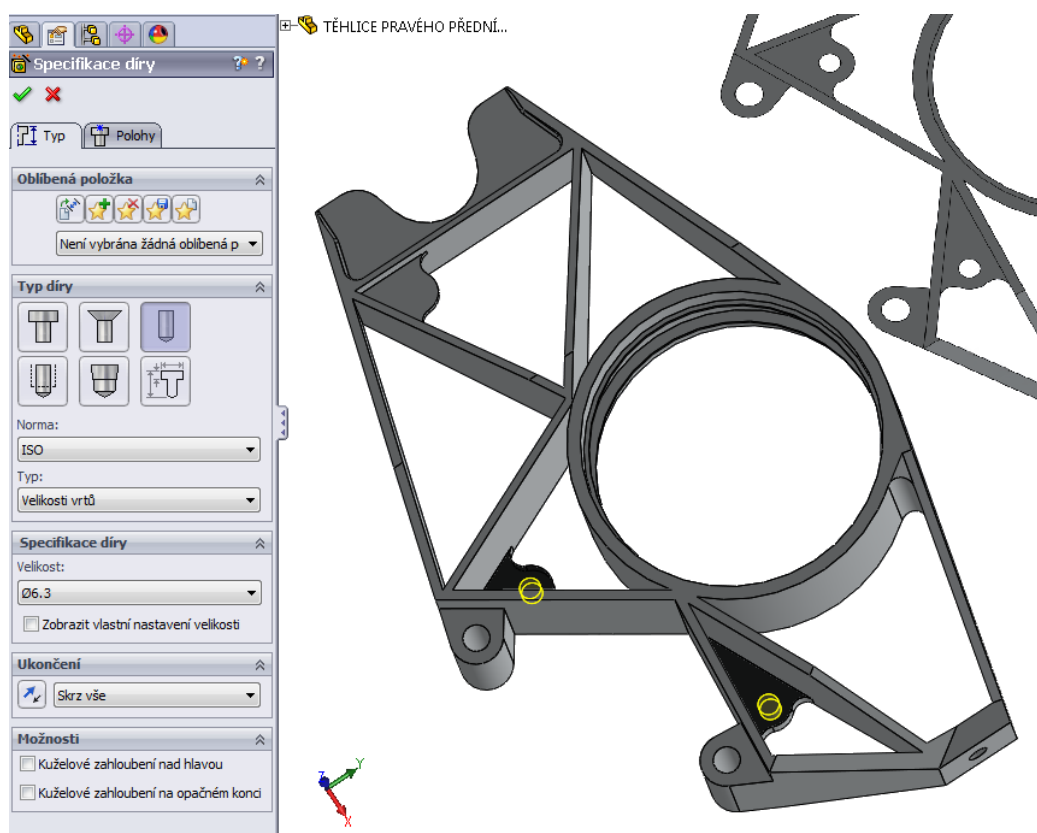
Obr. 53 Výsledný tvar pravé strany těhlice vytvořený za pomoci referenčních geometrií.

Operací 21 (viz obr. 54) byla tvorba dvou průchozích děr o průměru 8,1 mm pomocí průvodce dírami, ve kterém se pouze navolí parametry a pomocí 3D skici se určí poloha.



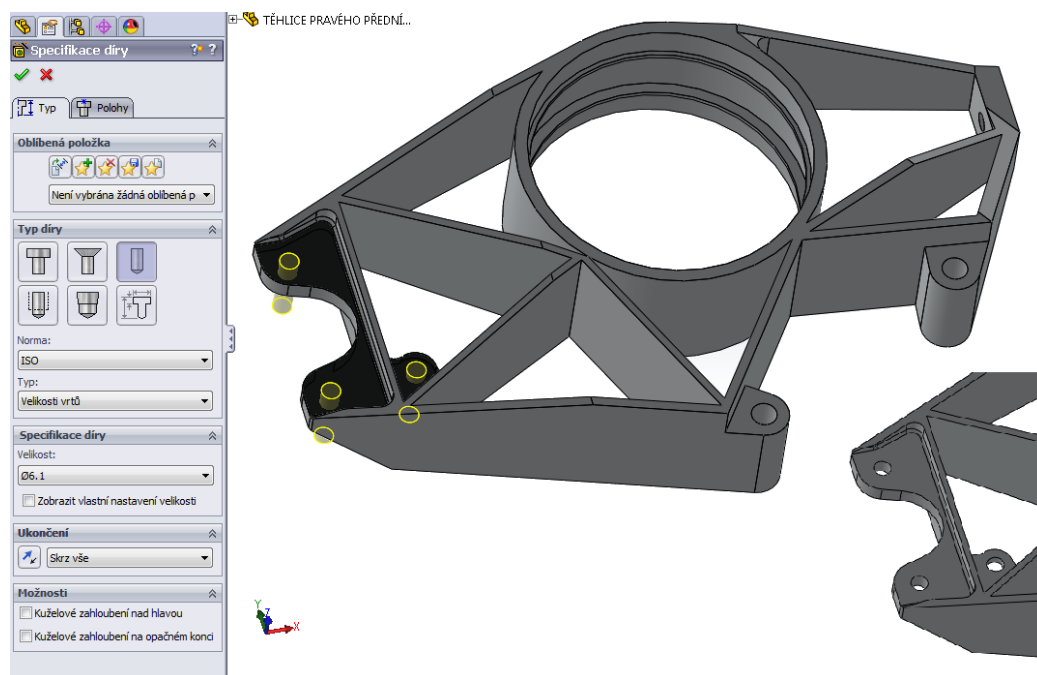
Obr. 54 Průchozí díry o průměru 8,1 mm.

Operací 22 (viz obr. 55) byla tvorba dalších dvou děr pomocí průvodce dírami, jež mají průměr 6,3 mm, jsou průchozí a mají své polohy na vytvořených plošinách.



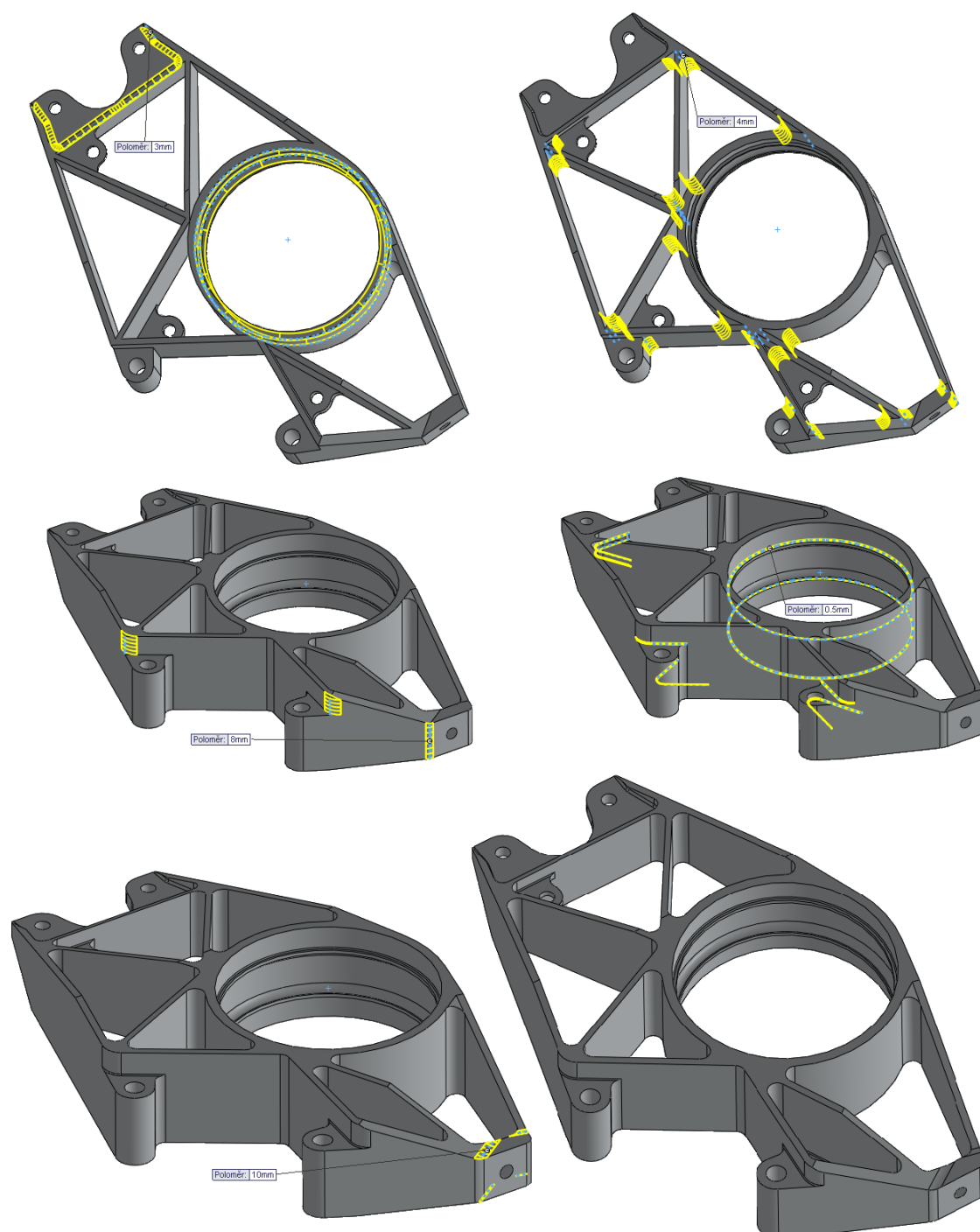
Obr. 55 Dvě průchozí díry o průměru 6,3 mm.

Operací 23 (viz obr. 56) byla tvorba dalších tří průchozích děr o průměru 6,1 mm pomocí průvodce dírami, kde pomocí 3D skici byly soustředně umístěny na již vytvořené plošiny.



Obr. 56 Tři průchozí díry o průměru 6,1 mm.

Operace 24, 25, 26, 27 a 28 (viz obr. 57) jsou zaoblení, které jsou poslední operace podílející se na výsledné podobě součásti těhlice pravého předního kola (vpravo dole). Jednotlivá zaoblení mají poloměry R3 (vlevo nahoře), R4 (vpravo nahoře), R8 (vlevo uprostřed), R0,5 (vpravo uprostřed) a R10 (vlevo dole). Výkres se zakótováním technologických rozměrů je v příloze 1.



Obr. 57 Zaoblení těhlice a její finální podoba.

3.2 Simulace zatěžování

Jelikož se jedná o součást, na které bude záviset bezpečnost řidiče stejně jako na mnoha dalších součástech vozu, bylo zapotřebí provést analýzu a ověření tuhosti konstrukce. Poněvadž simulace zatěžování není předmětem této diplomové práce, byl člen týmu TU Brno Racing a student ústavu automobilního a dopravního inženýrství pan Bc. Marek Fejfar požádán, aby provedl simulaci zatížení v softwaru Ansys metodou konečných prvků, což by potvrdilo dostatečnou tuhost konstrukce a její bezpečnost. Bc. Markem Fejfarem byly provedeny následující dvě analýzy stavů zatížení. Prvním stavem bylo brzdění a průjezd zatáčkou, druhým stavem byla jízda po dvou kolech.

3.2.1 Stav brzdění a průjezd zatáčkou

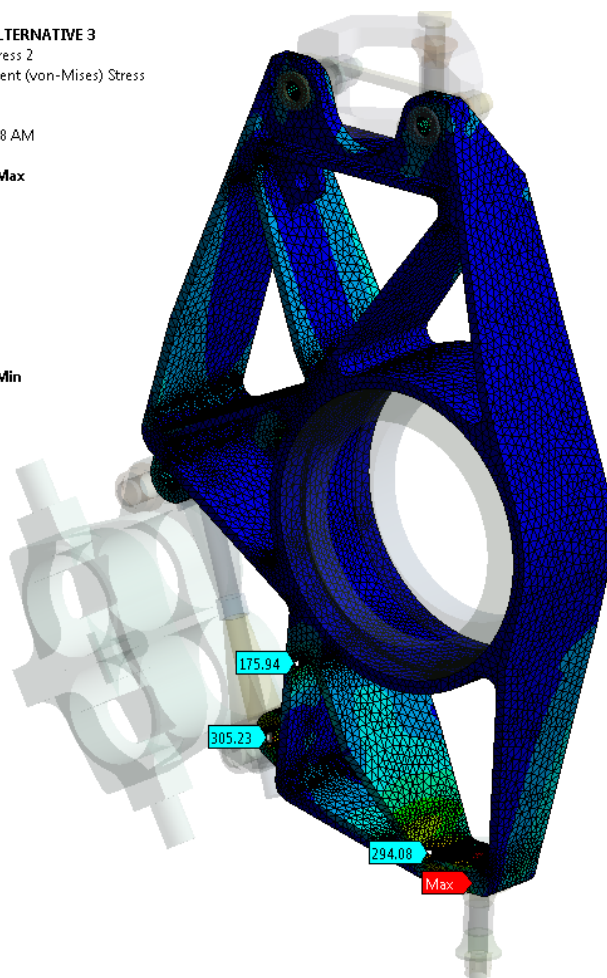
Síly byly počítány metodou "Load transfer". Brzdy:

- 2400 N - v kontaktu pneumatiky s vozovkou, ve směru protisměru jízdy, působí na vnitřní stranu ložisek,
- 1430 N - ve středu kola (statická síla), ve svislém směru vzhůru, působí na vnitřní stranu ložisek,
- 6000 N - brzdná síla od třmene působí na stěny třmene.

Výsledný výstup po simulaci zatěžování stavem brzdění a průjezdu zatáčkou je na obr. 58.

E: BRAKES ALTERNATIVE 3
Equivalent Stress 2
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 3
5/19/2014 7:38 AM

356.58 Max
257.27
225.11
192.96
160.8
128.64
96.482
64.324
32.166
0.1075 Min



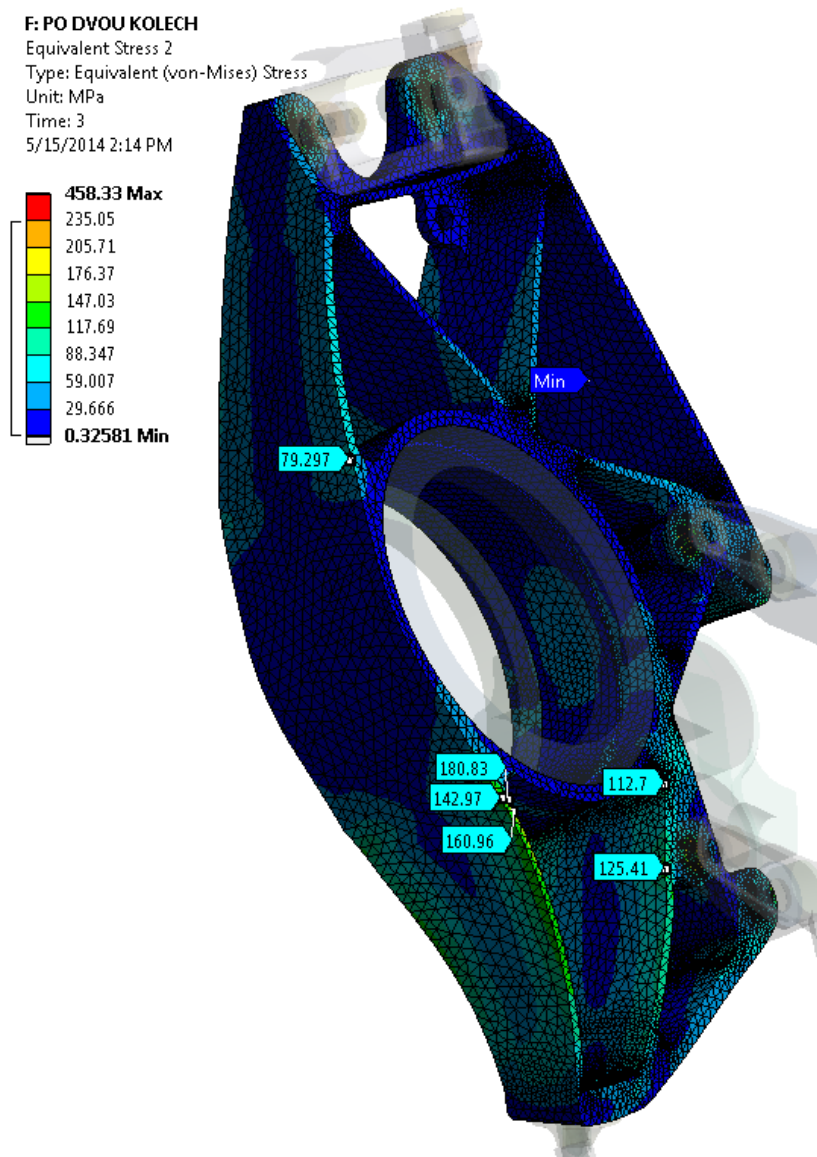
Obr. 58 Grafický výstup po simulaci zatěžování stavem brzdění a průjezdem zatáčkou.

3.2.2 Jízda po dvou kolech

Síly byly rovněž počítány metodou "Load transfer". Jízda po dvou kolech:

- 2800 N - v kontaktu pneumatiky s vozovkou, ve směru ke středu vozu, působí na vnitřní stranu ložisek,
- 1400 N - ve středu kola (statická síla), ve svislém směru vzhůru, působí na vnitřní stranu ložisek.

Stupně volnosti jsou vymezeny v bodech zavěšení. Zatěžována byla celá sestava včetně všech třecích kontaktů. Výsledný výstup po simulaci zatěžování stavem jízdy po dvou kolech je na obrázku 59.

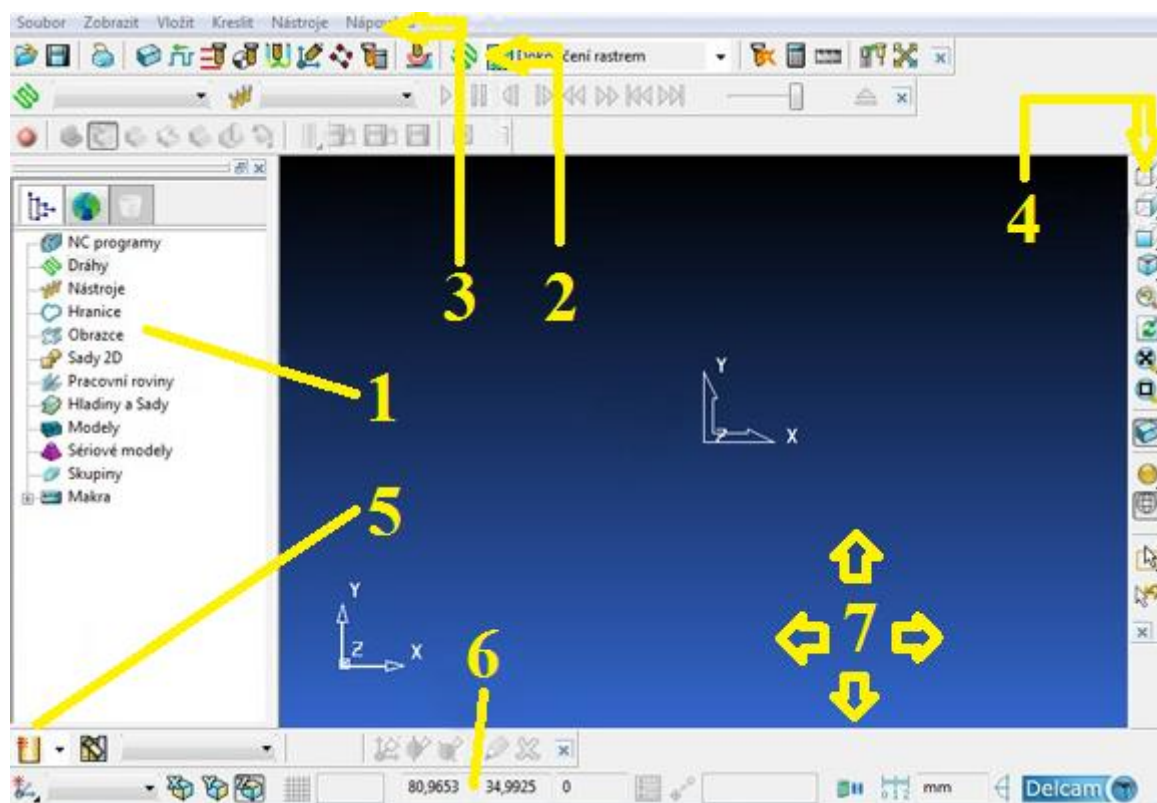


Obr. 59 Grafický výstup po simulaci zatěžování stavem jízdy po dvou kolech.

Výsledky obou analýz potvrdily dostatečnou tuhost konstrukce a její bezpečnost, tudíž nebylo nutné provádět žádné další změny na modelu součásti těhlice. Následovalo vytvoření výkresu (viz příloha 1), poté export modelu do formátu STEP a import do softwaru PowerMILL k návrhu frézovacích strategií.

3.3 Návrh frézovacích strategií v CAM softwaru PowerMILL 10

PowerMILL je CAM software společnosti Delcam určený pro CNC programování tříosých i víceosých frézovacích center. Jeho primární využití spočívá ve frézování tvarových ploch tříosými, čtyřosými nebo pětiosými frézovacími strategiemi, ale v případě potřeby dokáže i 2.5D frézování. K návrhu frézovacích strategií aplikovaných na součást těhlice byla zvolena verze PowerMILL 2010. Základní uživatelské prostředí této verze viz obr. 60 [43].

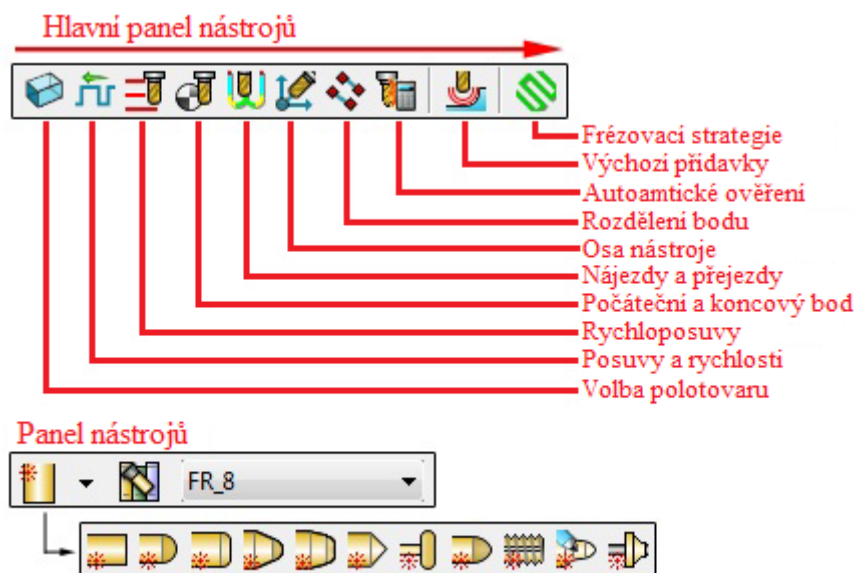


Obr. 60 Základní pracovní prostředí softwaru PowerMILL 10.

Popis jednotlivých oblastí pracovního prostředí PowerMILL [44]:

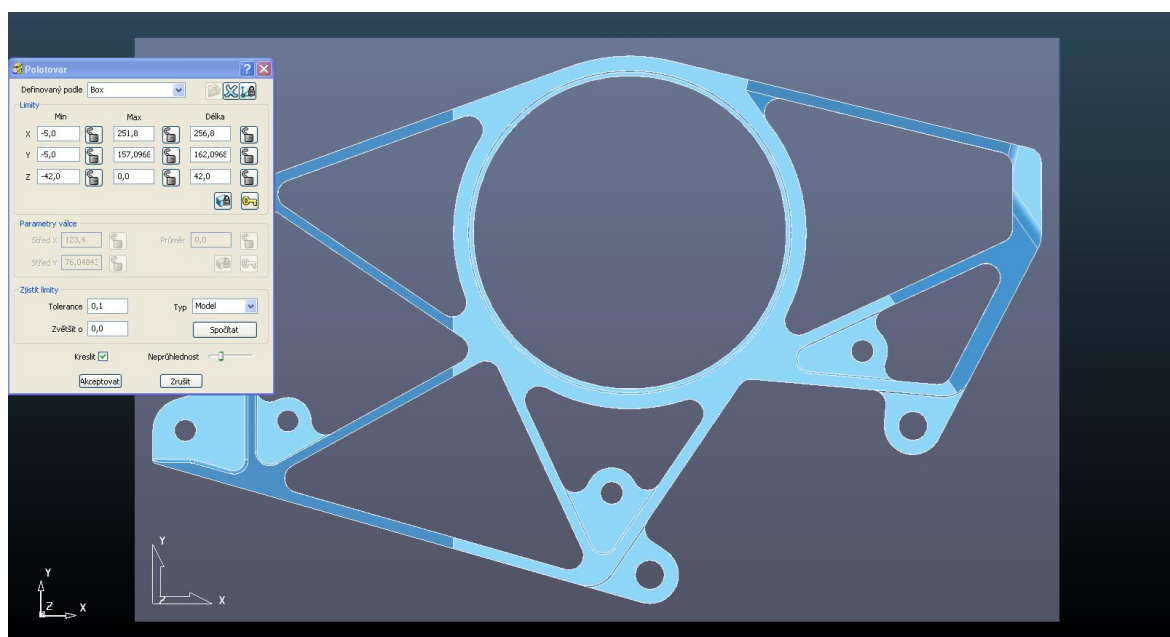
- (1) Průzkumník – stromový seznam sloužící k zobrazení všech vytvořených položek v PowerMILLu umožňující jejich editaci,
- (2) Hlavní panel nástrojů – slouží k rychlému přístupu k nejpoužívanějším příkazům,
- (3) Hlavní menu – obsahuje rozbalovací menu, v němž jsou obsažena podmenu,
- (4) Panel nástrojů pohledy – poskytuje rychlý přístup ke standardním pohledům na model a k možnostem stínování modelu,
- (5) Panel nástrojů – umožňuje rychlou tvorbu frézovacího nástroje,
- (6) Stavový řádek – slouží k připomenutí některých důležitých hodnot a umožňuje mimo jiné vytvoření pracovních rovin,
- (7) Grafické okno – graficky zobrazuje všechny operace aplikované na model.

Návrh frézovacích strategií je započat otevřením nového projektu a importem modelu CAD součásti ve formátu STEP. Software PowerMILL disponuje integrovanou aplikací Delcam Exchange, díky níž byl formát STEP převeden do souboru DGK, se kterým software PowerMILL operuje. Součást těhlice byla už od samotného počátku modelována s důrazem na následnou aplikaci CAM technologie v programu PowerMILL, proto byla osa Z umístěna už při konstrukci shodně s osou Z vřetena frézky, stejným způsobem byl importován i model do pracovního prostředí PowerMILLu a nebylo tedy zapotřebí žádné další transformace importovaného modelu (čili souřadný systém importovaného modelu je shodný se souřadným systémem prostředí PowerMILL). Při navrhování frézovacích strategií se na hlavním panelu nástrojů (označen číslem 2) postupuje systematicky podle uspořádání jednotlivých tlačítek tak, jak jdou za sebou, a to zleva doprava (viz obr. 61). Výjimku tvoří definování nástroje, jenž se provádí v panelu nástrojů, který je samostatně oddělen a jeho umístění je v levém dolním rohu pracovního prostředí (označen číslem 5). Při prvotním nastavení parametrů zůstanou tyto parametry zachovány i nadále pro následující frézovací strategii, proto není nutné při použití stejného nástroje tyto parametry znovu nastavovat.



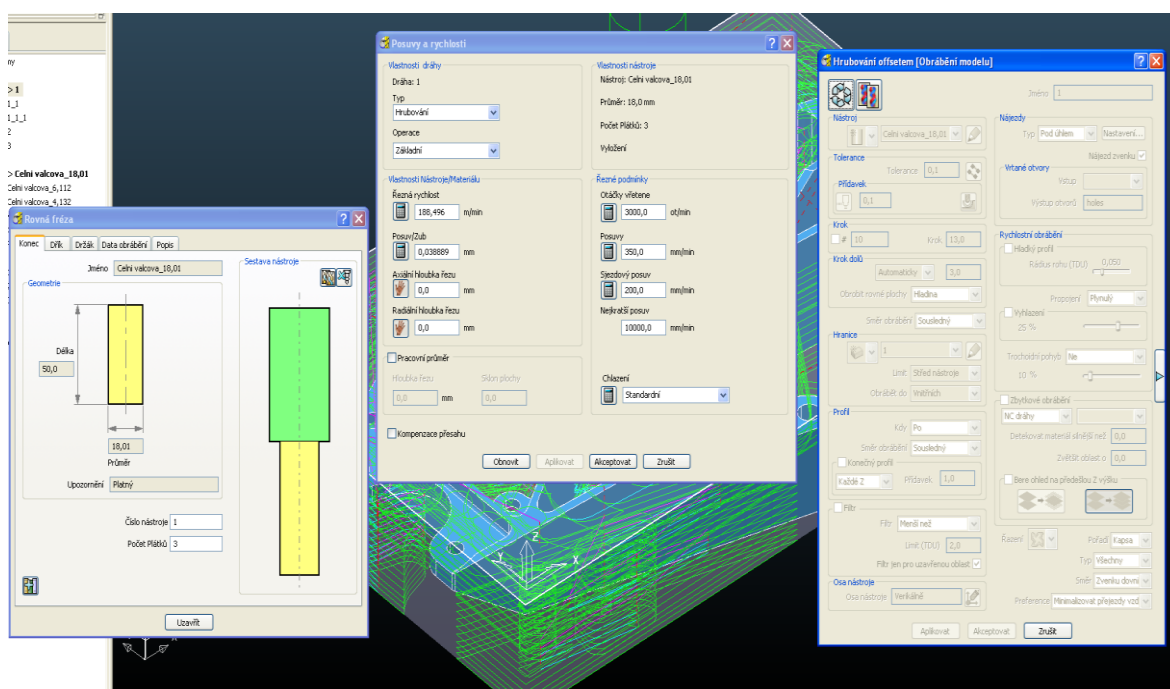
Obr. 61 Směr uspořádání tlačítek zleva doprava a rozvinuté podmenu volby nástroje.

Po načtení modelu vymodelované těhlice převedené do formátu DGK se dle systematiky postupu zleva doprava provedla volba polotovaru. Jelikož model těhlice má rozměry 246,8 mm na délku, 152,09 mm na šířku a 42 mm na výšku, byl zvolen polotovaz tvaru kvádra (v nastavení polotovaru definovaný jako box) s přídavky na frézování okolo modelu 5 mm (viz obr. 62). Důvodem tohoto je eliminace odchylek v případě, že by polotovaz nebyl zúhlovaný. Nulový bod obrobku byl umístěn do levého dolního rohu. Po nastavení souřadnic polotovaru se kliknutím na tlačítko spočítat toto nastavení projeví v grafickém okně a stiskem tlačítka akceptovat je volba polotovaru potvrzena.



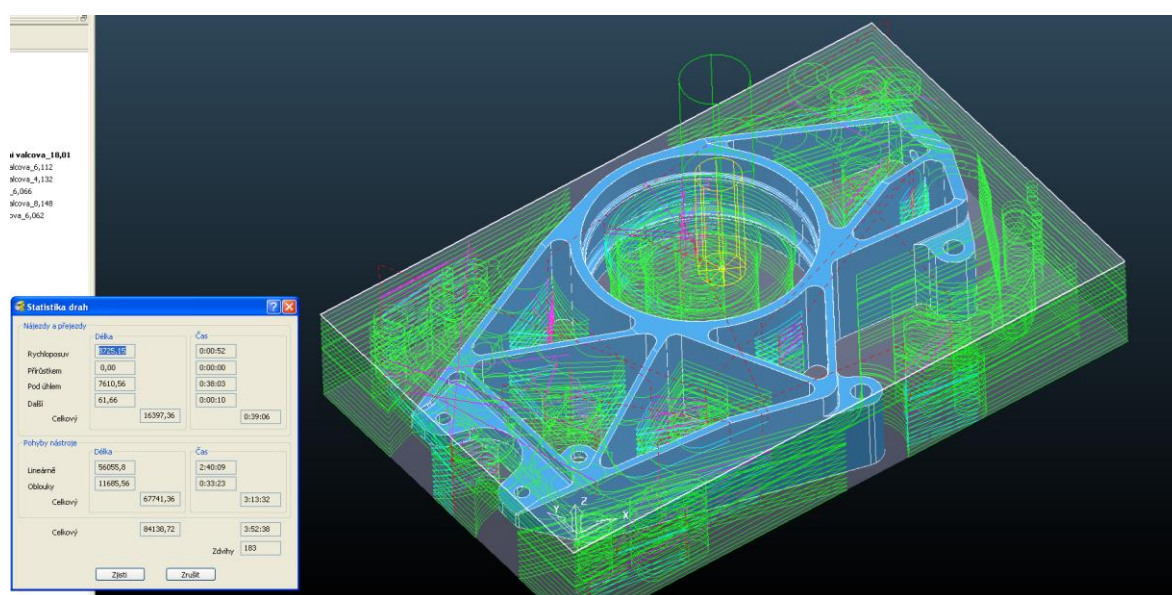
Obr. 62 Definice volby parametrů polotovaru a zobrazení těchto nastavení v grafickém okně.

První strategií je hrubování offsetem, pro niž byla zvolena jako nástroj fréza čelní válcová o průměru 18 mm se třemi břity, ale jelikož použitá fréza při výrobě nemá přesně průměr 18 mm, ale 18,01 mm, byla provedena korekce nástroje na tento průměr. V hlavním panelu nástrojů 2. tlačítko zleva doprava jsou posuvy a rychlosti, ve kterém se nastaví pro tento typ nástroje řezné podmínky. Jak je možno vidět na obr. 63, řezná rychlost a posuv na zub jsou automaticky programem dopočítány na základě zadaného průměru, tudíž byly zadány pouze řezné podmínky a to otáčky vřetene 3000 ot/min, dále posuvová rychlost 350 mm/min, sjezdový posuv 200 mm/min a rychloposuv 10000 mm/min. Při procesu obrábění bylo aplikováno standardní chlazení.



Obr. 63 Nastavení nástroje, posuvů a rychlostí pro první hrubovací strategii hrubování offsetem.

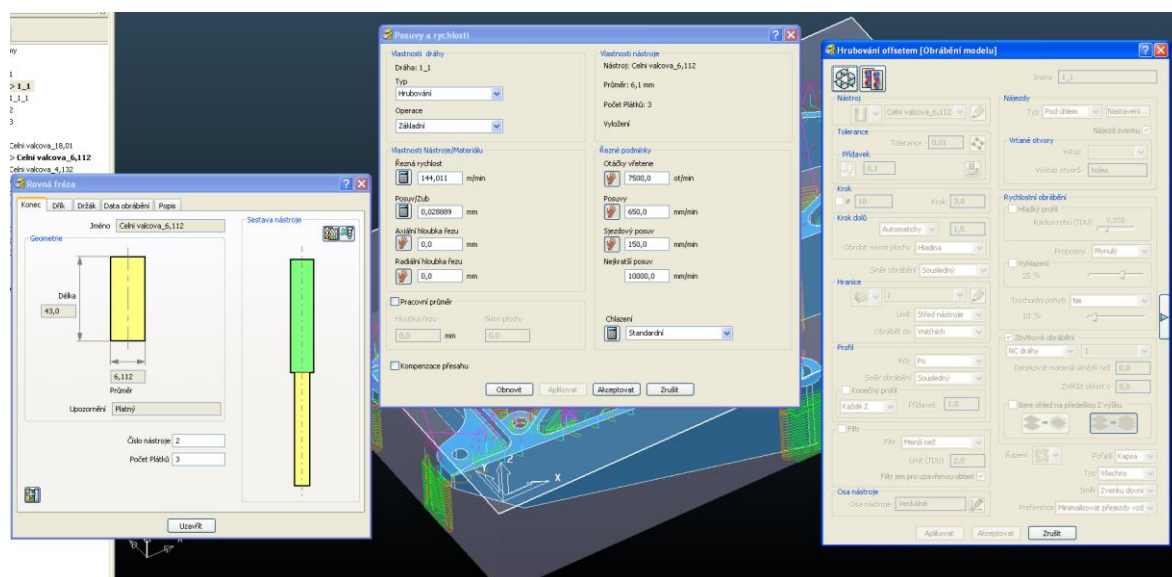
V hrubovací strategii hrubování offsetem byla nastavena tolerance na hodnotu 0,1. Je vhodné tuto hodnotu volit rozumně, aby čas frézování při hrubování nebyl příliš dlouhý, což by zbytečně prodražovalo výrobu, ale zároveň aby při dokončování nástroj nezajížděl moc hluboko do zbytkového materiálu po hrubování v důsledku příliš vysoké hodnoty této tolerance. Dále byl nastaven přírůstek 0,1 mm pro další frézovací strategii, kterou bude dokončovací frézování. Mimo to byl nastaven krok 13 mm, což při průměru frézy 18,01 mm činí šířku záběru cca 75% průměru. Dráha frézy při kroku překrývá odfrézovanou část předchozího kroku frézy jen z 25%. Předposledním parametrem nastavení byl krok dolů o 3 mm, což je hloubka záběru a_p . Její velikost byla volena s ohledem na používaný způsob upnutí nástrojů pomocí kleštinového upínače. Na obr. 64 jsou zelenou barvou zobrazeny dráhy, kterými je materiál odebírán, růžovou jsou nájezdy a červenou rychloposuvy. Dále je na něm možno vidět statistiku drah, kdy celkový čas hrubování trvá 3 hodiny 52 minut a 36 sekund, z toho 39 minut náleží nájezdům a přejezdům.



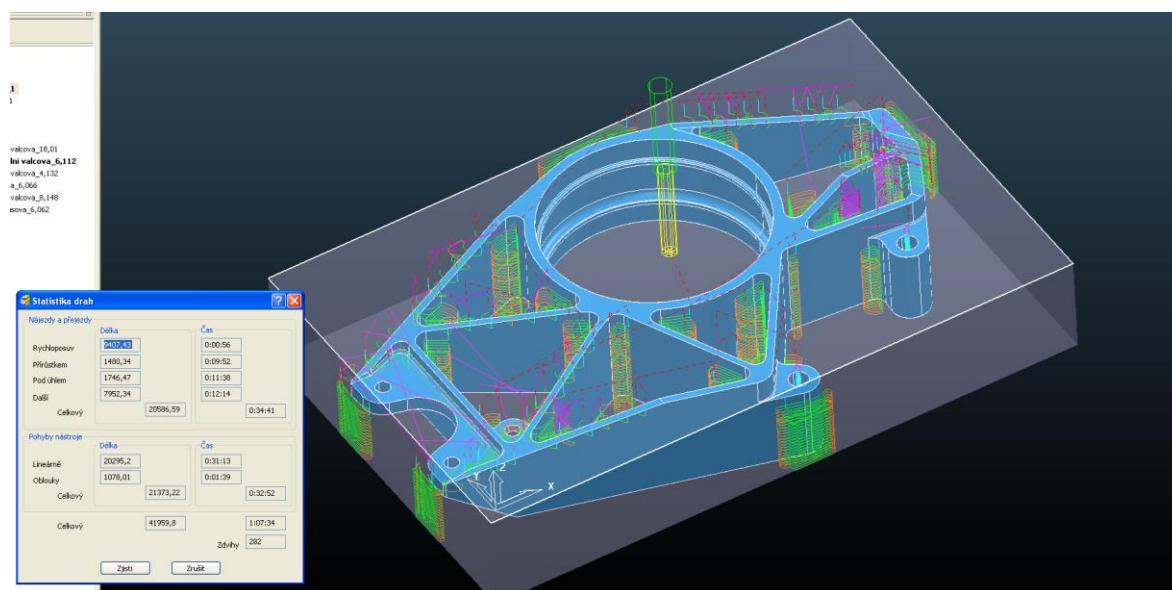
Obr. 64 Vygenerované dráhy pomocí první frézovací strategie hrubování offsetem.

Druhou strategií bylo zbytkové obrábění materiálu zbylého po prvotní hrubovací strategii. Jako frézovací strategie bylo opět zvoleno hrubování offsetem (viz obr. 65). Bylo zapotřebí vytvořit nový nástroj, v tomto případě byla aplikována fréza čelní válcová průměru 6 mm, ale po změření skutečné frézy použité při výrobě bylo zapotřebí aplikovat korekce, takže skutečná hodnota průměru byla 6,112 mm, počet břitů byl nastaven na hodnotu 3. Tato fréza odfrézuje zbytkový materiál, který při prvotní strategii nebyla schopna odhrubovat fréza o průměru 18,01 mm. Dle systematiky zleva doprava byly pro tento nástroj zvoleny tlačítkem posuvy a rychlosti řezné podmínky a to otáčky vřetene 7500 ot/min, posuvová rychlost 650 mm/min, sjezdový posuv 150 mm/min a rychloposuv 10000 mm/min. Chlazení bylo zvoleno opět jako standardní. V nastavení hrubovací strategie byla zvolena tolerance o řád menší než u předchozí strategie, čili na hodnotu 0,01. Jelikož je v tomto případě frézováno frézou průměru 6,112 mm, byl nastaven krok šířky záběru na 3 mm, čili fréza bude při každém kroku frézovat poloviční délkou svého průměru. Hloubka záběru byla dle výrobce zvolena $a_p = 1,5$ mm. Důležitým nastavením je zaškrtnutí políčka zbytkové obrábění z první dráhy. Po zobrazení statistiky drah (viz obr. 66) je celkový čas frézování touto zbytkovou hrubovací strategií 1 hodina, 7 minut a 34 sekund, z čehož nájezdy a přejezdy nástroje zabírají čas 34 minut a 41 sekund. Opět zelenou barvou je

zobrazen odebíraný zbytkový materiál, růžovou barvou nájezdy a přejezdy a červenou barvou rychloposuvy.



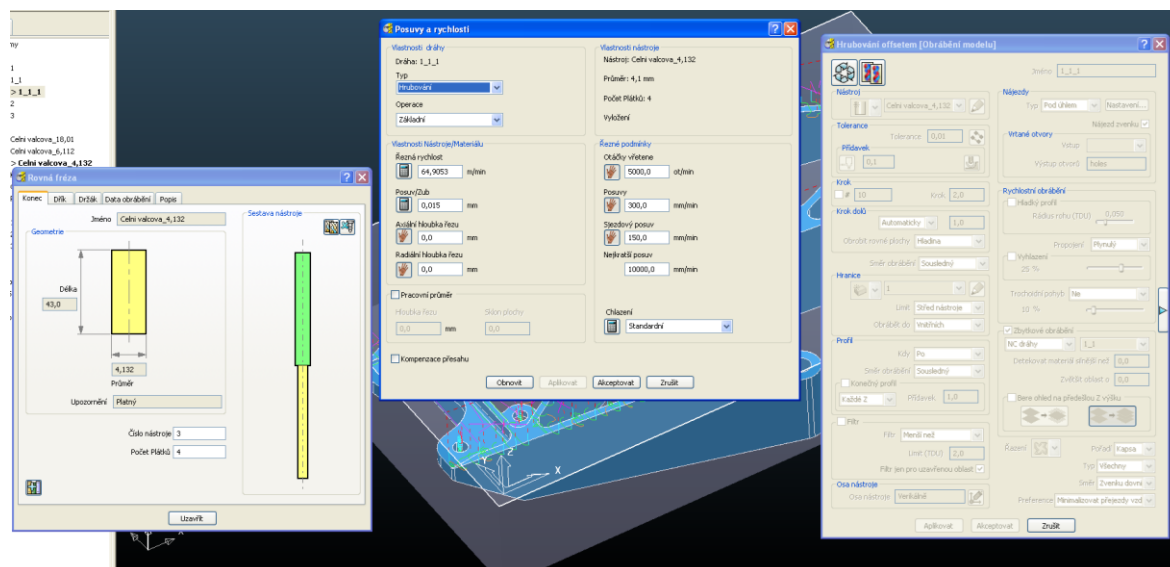
Obr. 65 Nastavení parametrů nástroje, řezných podmínek u hrubování offsetem.



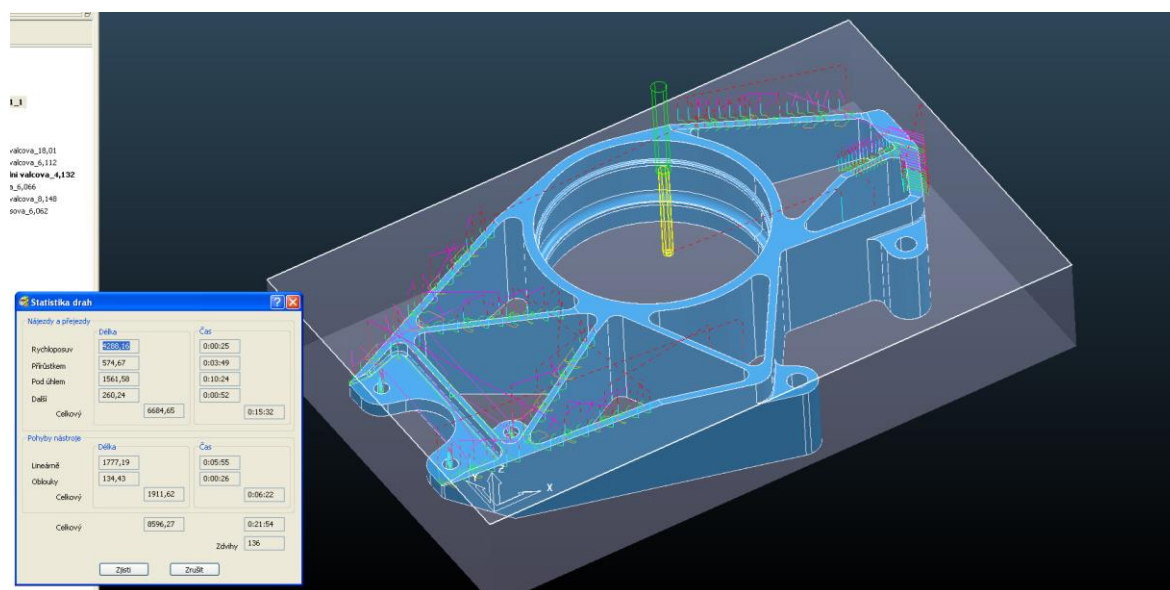
Obr. 66 Dráhy druhé frézovací strategie hrubování offsetem a její statistika.

Třetí frézovací strategií (viz obr. 67) bylo opět hrubování offsetem zbytkového materiálu zbylého po druhé hrubovací strategii, pro kterou byl vytvořen nový nástroj fréza čelní válcová o průměru 4 mm se 4 břity. Po aplikaci korekcí naměřených u skutečného nástroje byl průměr nástroje nastaven na hodnotu 4,132 mm. Tímto nástrojem bude vyfrézováno zešíkmení ploch a zbylé tři průchozí díry o průměru 6,1 mm. Dle systematiky zleva doprava tlačítkem posuvy a rychlosti byly zvoleny řezné podmínky a to otáčky vřetene 5000 ot/min, posuvová rychlost 300 mm/min, sjezdový posuv 150 mm/min a rychloposuv 10000 mm/min. Chlazení bylo zvoleno opět jako standardní. U hrubovací strategie offsetem byla tolerance zachována na hodnotě 0,01 mm, radiální krok byl nastaven na 50% hodnoty průměru, čili na 2 mm a hloubka záběru $a_p = 1$ mm. Opět bylo zaškrtnuto políčko pro zbytkové obrábění předchozí dráhy vyfrézované frézou s průměrem 6,112 mm, čili

druhé strategie hrubování offsetem. Zobrazení statistiky (viz obr. 68) dráhy dává informaci, že celkový čas třetí hrubovací strategie bude 21 minut a 54 sekund, z čehož čas nájezdů a přejezdů zabírá 15 minut a 32 sekund.

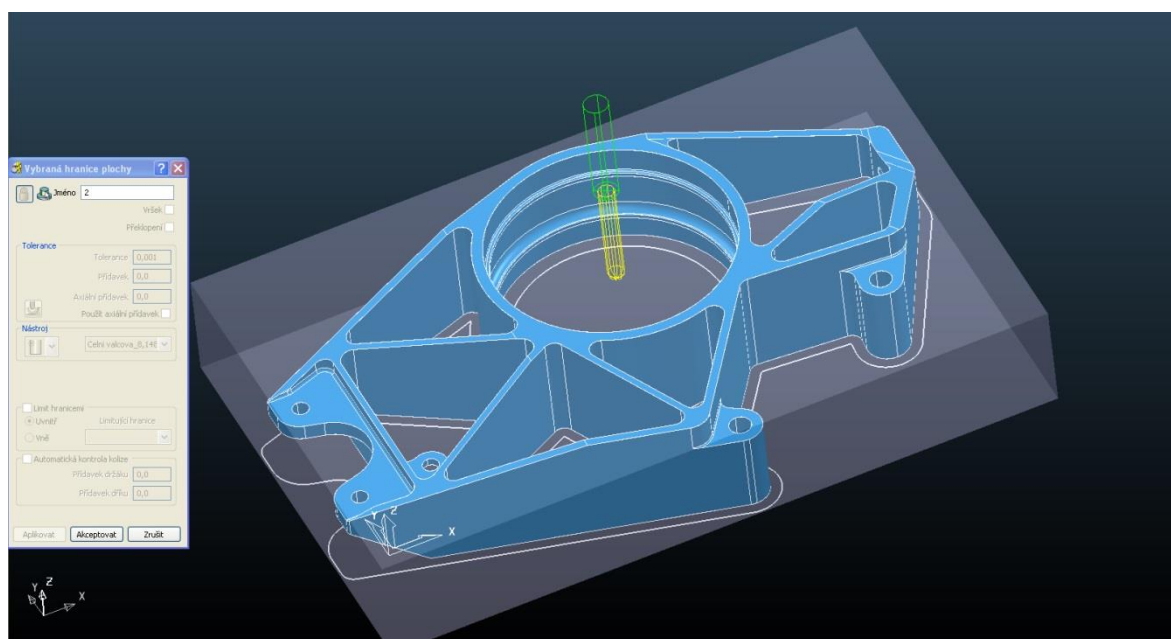


Obr. 67 Zobrazení nastavení nástroje, posuvů a rychlostí u třetí hrubovací strategie.



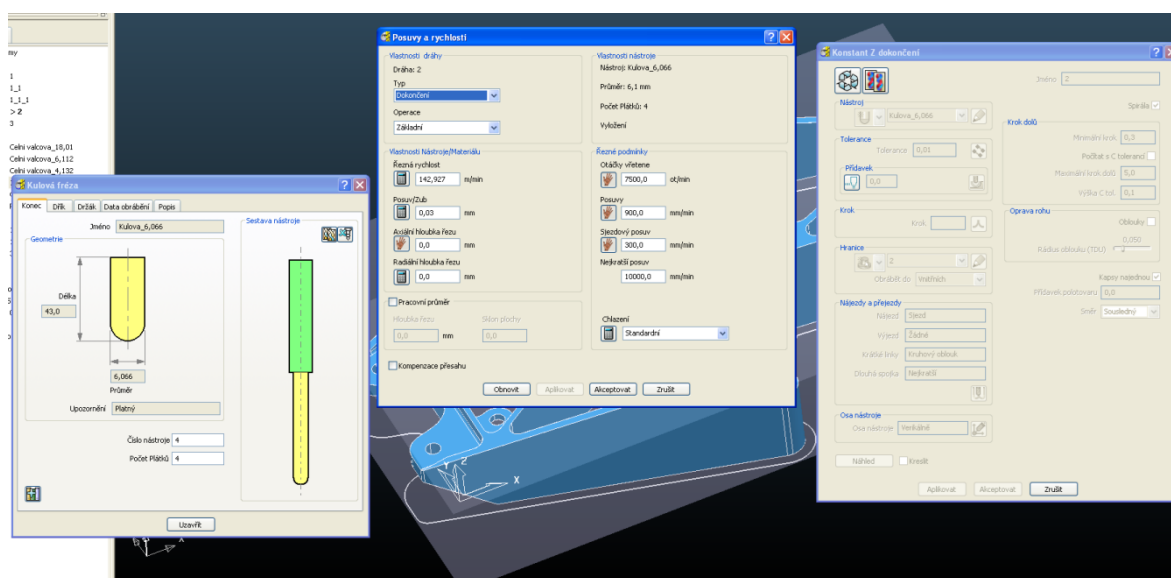
Obr. 68 Vygenerované dráhy třetí strategie u hrubování offsetem a jeho statistika.

Pro všechny tyto tři hrubovací strategie byla použita hranice typu polotovaru. Tímto bylo hotovo vše z hrubovacích strategií a mohlo se přejít ke strategiím dokončovacím, pro které byla zvolena hranice typu vybraná hranice plochy (viz obr. 69). Tolerance hranice byla nastavena na hodnotu 0,001.



Obr. 69 Zobrazení hranice typu vybraná hranice plochy.

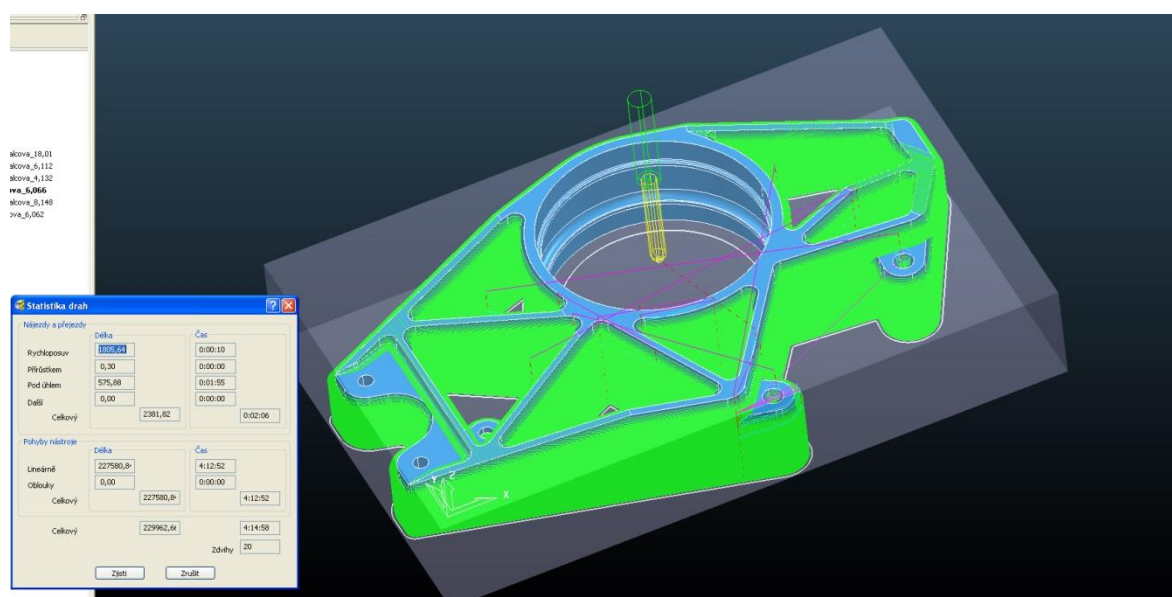
Čtvrtou strategií, tentokrát už dokončovací, byla zvolena strategie tzv. konstant Z dokončení (viz obr. 70). Byl vytvořen nástroj fréza kulová o průměru 6,066 mm po aplikaci korekcí naměřených na skutečném nástroji (bez korekcí o průměru 6 mm), počet břitů byl nastaven na hodnotu 4. Řezné podmínky byly následující a to otáčky vřetene 7500 ot/min, posuvová rychlost 900 mm/min, sjezdový posuv 300 mm/min a rychloposuv opět 10000 mm/min. Pro tuto strategii bylo opět zvoleno chlazení vnější.



Obr. 70 Zobrazení nastavení nástroje, řezných podmínek a strategie konstant Z dokončení.

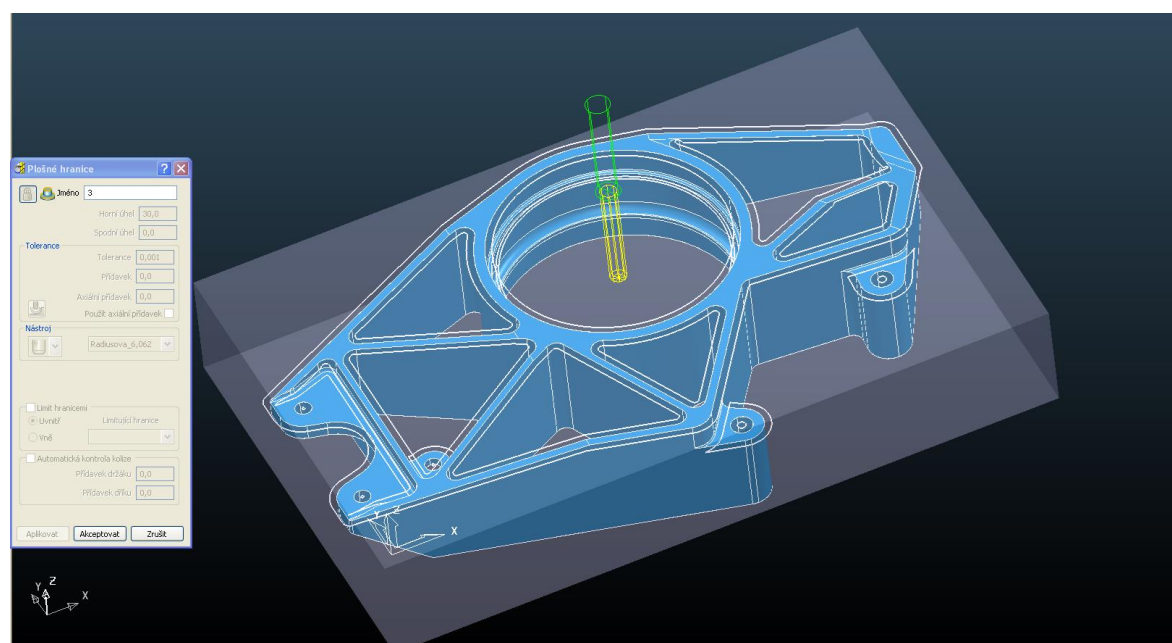
U dokončovací strategie konstant Z dokončení byla nastavena hodnota tolerance na 0,01, pro přídavek na obrábění. Jelikož jde o dokončování, byla nastavená hodnota 0, hranice byla zvolena jako hranice číslo 2 (vybraná hranice plochy). Na obrázku 71 je zelenou barvou opět zobrazeno, co vše je frézováno, růžově nájezdy a přejezdy a červeně rychloposuvy. Celkový čas této strategie je 4 hodiny, 14 minut a 58 sekund, z čehož

4 hodiny, 12 minut, 52 sekund zabírá samotné odebrání materiálu a pouze 2 minuty a 6 sekund nájezdy a přejezdy.



Obr. 71 Vygenerované dráhy a jejich statistika pro strategii konstant Z dokončení.

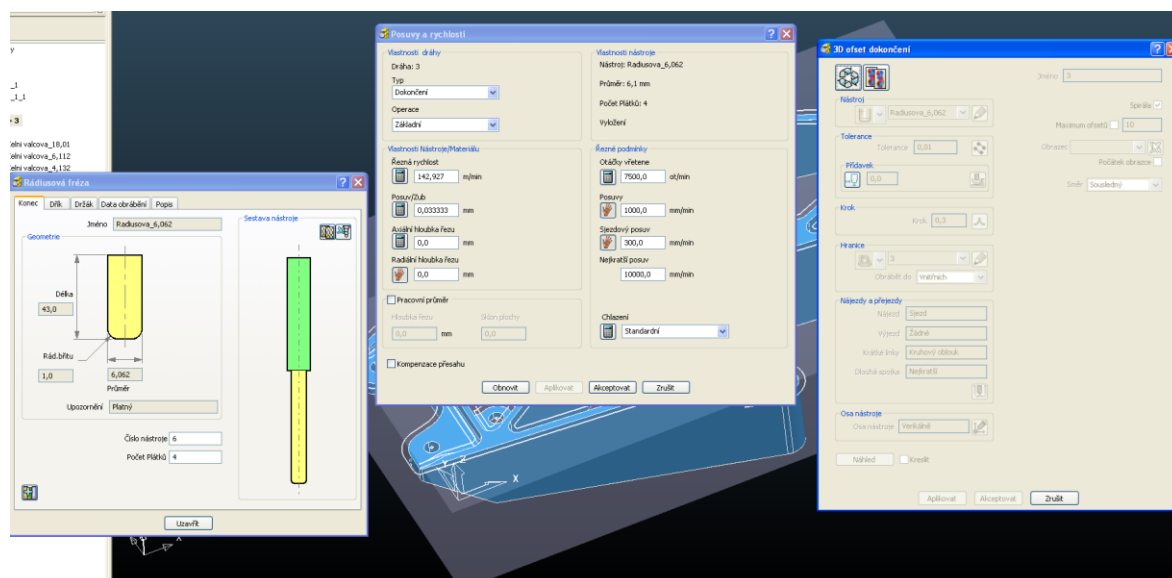
Pátou a poslední strategií je 3D offset dokončení pro operaci zarovnání čel. Pro tuto strategii bylo opět nutné vytvoření nové hranice a to plošné hranice (viz obr. 72).



Obr. 72 Zobrazení hranice typu plošná hranice.

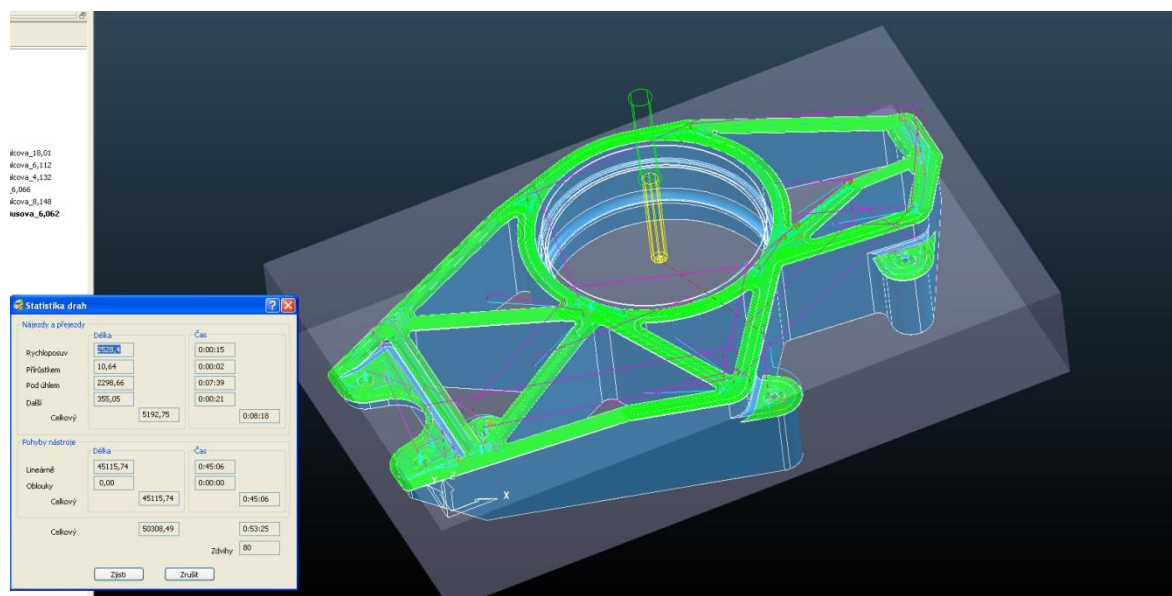
Pro tuto hranici byl vytvořen poslední nástroj, což byla fréza rádiusová o průměru 6 mm, po aplikaci korekcí o průměru 6,062 mm. Rádus břitů frézy je 1 mm a počet břitů je 4. Tolerance hranice byla nastavena opět na 0,001, přídávek na hodnotu 0 mm a nástroj pro vytvoření hranice vytvořená rádiusová fréza s průměrem 6,062 mm. Řezné podmínky pro tuto strategii jsou otáčky vřetene 7500 ot/min, posuvová rychlost 1000 mm/min, sjezdový posuv 300 mm/min a rychloposuv 10000 mm/min.

U dokončovací strategie 3D offset dokončení (viz obr. 73) byla tolerance nastavena opět na hodnotu 0,01, přírůstek na obrábění nastaven na hodnotu 0 mm (jde o dokončovací operaci). Jako hranice této strategie byla zvolena vytvořená hranice 3 (plošná hranice) s vnitřním obráběním, krok opět nastaven na hodnotu 0,3 a nájezd do materiálu po spirále.



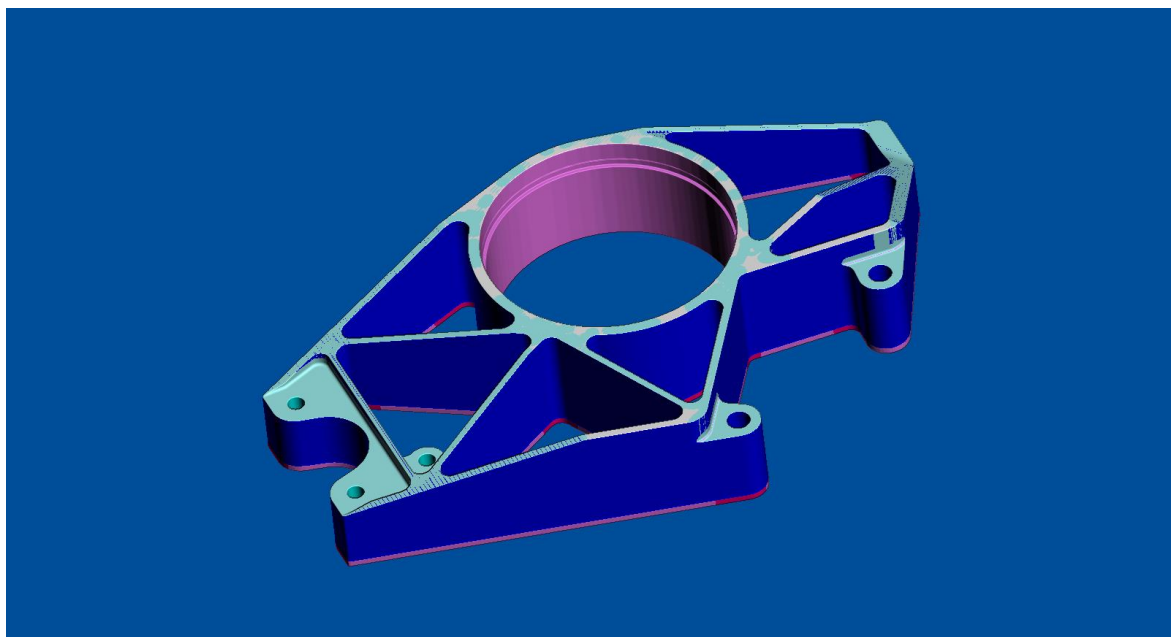
Obr. 73 Nastavení nástroje, řezných podmínek a parametrů u strategie 3D offset dokončení.

Celkový čas této strategie je 53 minut a 25 sekund, z něhož 8 minut a 18 sekund zabírá čas nájezdů a přejezdů. Zobrazení drah a statistiky je na obr. 74.



Obr. 74 Vygenerované dráhy a jejich statistika pro strategii 3D offset dokončení.

Tímto je první strana těhlice vyrobena. Následovalo ověření vytvořených strategií pomocí aplikace ViewMILL (simulace drah) v pořadí tak, jak jsou popsány za sebou, po jehož simulaci vypadá výsledná podoba prototypu těhlice po frézování první strany tak, jak je zobrazeno na obr. 75. Celkový čas nutný pro vyfrézování těhlice do této podoby první strany před přeupnutím a vyfrézováním strany druhé je 10 hodin, 30 minut a 5 sekund. V levé části těhlice jsou tři díry o průměrech 6,1 mm zobrazeny světle modrou barvou, což značí, že nejsou průchozí. Průchozími se stanou až po přeupnutí těhlice z druhé strany a následném ofrézování materiálu, který momentálně brání průchodnosti těchto děr.



Obr. 75 Podoba těhlice ve ViewMILLu po aplikaci prvních pěti strategií.

Analogickým způsobem byla vyrobena i druhá strana prototypu těhlice. Celkový čas nutný pro výrobu těhlice z obou stran pomocí všech 8 strategií je 12 hodin a 46 sekund (není započtena výměna nástrojů, práce obsluhy atd., pouze samotný čas frézování součásti). Po této poslední strategii následovalo vygenerování jednotlivých NC programů. Samotný proces vytvoření NC programu se provede pomocí volby Vytvořit individuální NC program, kde se zvolí možnost Zapsat v kontextové nabídce. Poté byly NC programy přeloženy pomocí postprocesoru do NC kódu kompatibilního s řídicím systémem CNC obráběcího centra, na němž bude prováděna výroba prototypu těhlice. Ukázka NC programu a kódu je zobrazena v příloze 4.

4 VÝROBA TĚHLICE PRAVÉHO PŘEDNÍHO KOLA

Realizace výroby těhlice předního pravého kola byla uskutečněna ve firmě BOSCH DIESEL s.r.o. (dále bude používáno pouze BOSCH) sídlící v Jihlavě v jeho školicím středisku. Toto školicí středisko slouží ke vzdělávání zaměstnanců firmy BOSCH (logo firmy viz obr. 76), dále zejména učňovským oborům ze strojních učilišť, ale také studentům středních a vysokých škol, kde se studenti naučí propojení teorie s praxí. Vybavení tohoto střediska bylo částečně dotováno z fondů Evropské unie. Tato jihlavská divize se zabývá výrobou komponentů pro systém vstřikování Common Rail u dieselových motorů moderních automobilů. Mezi hlavními vyráběnými produkty jsou, tlakové regulační ventily, vysokotlaké zásobníky a vysokotlaká vstřikovací čerpadla [45].



BOSCH

Obr. 76 Logo firmy BOSCH s.r.o. [45].

4.1 Popis CNC obráběcího centra MCV 754 QUICK

Realizace výroby prototypu těhlice byla provedena na tříosém CNC obráběcím centru MCV 754 QUICK (viz obr. 77) s řídicím systémem Heidenhain iTNC 530 od firmy Kovosvit MAS. Jeho technická data jsou uvedena v tabulce 8.

Tab. 8 Technická data CNC obráběcího centra MCV 754 QUICK [46].

| Stůl | | |
|---|-------------------------|-----------------------|
| Upínací plocha stolu | [mm] | 1 000 x 500 |
| T-drážky | [mm] | 3 x 18 x125 |
| Maximální zatížení stolu | [kg] | 400 |
| Pracovní rozsah | | |
| Osa X | [mm] | 754 |
| Osa Y | [mm] | 500 |
| Osa Z | [mm] | 550 |
| Vzdálenost čela vřetena od upínací plochy stolu | [mm] | 100 - 650 |
| Vřeteno | | |
| Kuželová dutina vřetena | - | ISO 40 |
| Maximální otáčky | [min ⁻¹] | 10 000 |
| Změna otáček | - | plynule měnitelné |
| Motor | | |
| Výkon motoru vřetena (S1/S6 – 40%) | [kW] | 9/13 |
| Jmenovitý krouticí moment (S1/S6 – 40%) | [Nm] | 57/83 |
| Maximální celkový příkon stroje | [kVA] | 25 |
| Posuv | | |
| Pracovní posuv X, Y, Z | [mm.min ⁻¹] | 1 – 15 000 |
| Rychloposuv | [m.min ⁻¹] | 30 |
| Rozměry a hmotnost stroje | | |
| Délka x šířka x výška | [mm] | 2 320 x 2 590 x 2 560 |
| Hmotnost stroje | [kg] | 4 000 |
| Přesnost ISO 230-2 | | |
| Přesnost nastavení polohy | [mm] | 0,012 |
| Opakovatelnost nastavení polohy | [mm] | 0,005 |
| Odměřování X, Y, Z | - | přímé |



Obr. 77 CNC obráběcí centrum MCV 754 QUICK od výrobce Kovosvit MAS.

4.2 Popis výroby těhlice předního kola

Polotovarem byl kvádr o rozměrech 255 x 160 x 50 mm ze slitiny hliníku pro tvárění EN AW-7022 neboli slitina AlZn5Mg3Cu známá pod obchodním označením CERTAL, jež byla podrobněji popsána v kap. 2.2.3. Výrobní postup byl podrobně popsán v kapitole 3.3, ale jeho kompletní technologická forma je uvedena v příloze 3. Všechny nástroje byly upnuty kleštinovým upínačem se strmým kuzelem ISO 40. Před samotným započítím výroby bylo zapotřebí provést měření délkové a poloměrové korekce nástrojů na měřicím přístroji od výrobce Zoller (viz obr. 78). Ten je vybaven kamerovým zpracováním obrazu, na kterém se nastaví vertikální a horizontální čára protínající se v pomyslném bodě ostří nástroje. Na tomto principu je poté změřena jak délková tak poloměrová korekce. Při aplikaci tohoto nástroje na CNC obráběcím centru, je tato korekce zanesena do tabulky nástrojů řídicího systému stroje [47].



Obr. 78 Měřicí aparatura pro délkovou a poloměrovou korekci nástrojů od firmy Zoller.

Nástroje použité při výrobě prototypu těhlice na CNC obráběcím centru MCV 754 QUICK jsou uvedeny v tabulce 9 i s aplikovanými řeznými podmínkami.

Tab. 9 Přehled aplikovaných fréz na CNC obráběcím centru MCV 754 QUICK.

| Zobrazení použitých fréz | Popis |
|---|---|
|  | <p>čelní válcová fréza stopková Ø 18 mm (s korekcemi 18,01 mm), výrobce: FRANKEN, materiál: HSS s povlakem TiCN, počet břitů: 3, chlazení: vnější, řezné podmínky: $v_c = 189 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f_z = 0,04 \text{ mm}$, $n = 3000 \text{ min}^{-1}$, $a_p = 3 \text{ mm}$.</p> |
|  | <p>čelní válcová fréza stopková Ø 6 mm (s korekcemi 6,12 mm), výrobce: FRANKEN, materiál: HSS s povlakem TiCN, počet břitů: 3, chlazení: vnější, řezné podmínky: $v_c = 144 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f_z = 0,03 \text{ mm}$, $n = 7500 \text{ min}^{-1}$, $a_p = 1,5 \text{ mm}$.</p> |
|  | <p>čelní válcová fréza stopková Ø 4 mm (s korekcemi 4,132 mm), výrobce: FRANKEN, materiál: HSS s povlakem TiCN, počet břitů: 4, chlazení: vnější, řezné podmínky: $v_c = 65 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f_z = 0,015 \text{ mm}$, $n = 5000 \text{ min}^{-1}$, $a_p = 1 \text{ mm}$.</p> |
|  | <p>kulová fréza stopková Ø 6 mm (s korekcemi 6,066 mm), výrobce: FRANKEN, materiál: HSS s povlakem TiCN, počet břitů: 4, chlazení: vnější, řezné podmínky: $v_c = 143 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f_z = 0,03 \text{ mm}$, $n = 7500 \text{ min}^{-1}$, $a_p = 0,3 \text{ mm}$.</p> |
|  | <p>rádusová fréza stopková Ø 6 mm (s korekcemi 6,062 mm), výrobce: FRANKEN, materiál: HSS s povlakem TiCN, počet břitů: 4, radius břitu 1 mm, chlazení: vnější, řezné podmínky: $v_c = 143 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f_z = 0,03 \text{ mm}$, $n = 7500 \text{ min}^{-1}$, $a_p = 0,3 \text{ mm}$.</p> |

Po zanesení korekcí do řídicího systému stroje je zapotřebí najet v jednotlivých osách do referenčního bodu frézky R, čímž dojde ke kalibraci mezi odměřovacím zařízením frézky a nulovým bodem M. Nulový bod stroje M je určen výrobcem a nelze jej změnit. Vzdálenosti mezi referenčním bodem R a nulovým bodem stroje M jsou poté uloženy v řídicím systému stroje jako konstanty. Vygenerované NC programy pomocí softwaru PowerMILL byly do CNC obráběcího centra nahrány pomocí flash karty přes USB port, kde byly před samotným obráběním tyto NC programy odsimulovány. Po upnutí polotovaru do svěráku bylo zapotřebí provést nastavení nulového bodu obrobku W pomocí dotykové sondy Heidenhain TS 220, který je umístěn v levém dolním rohu polotovaru. Sonda byla přes kužel ISO 40 upnuta do vřetena stroje (viz obr. 79) a pomocí kabelu připojena do konektoru umístěného na vřetenu stroje.

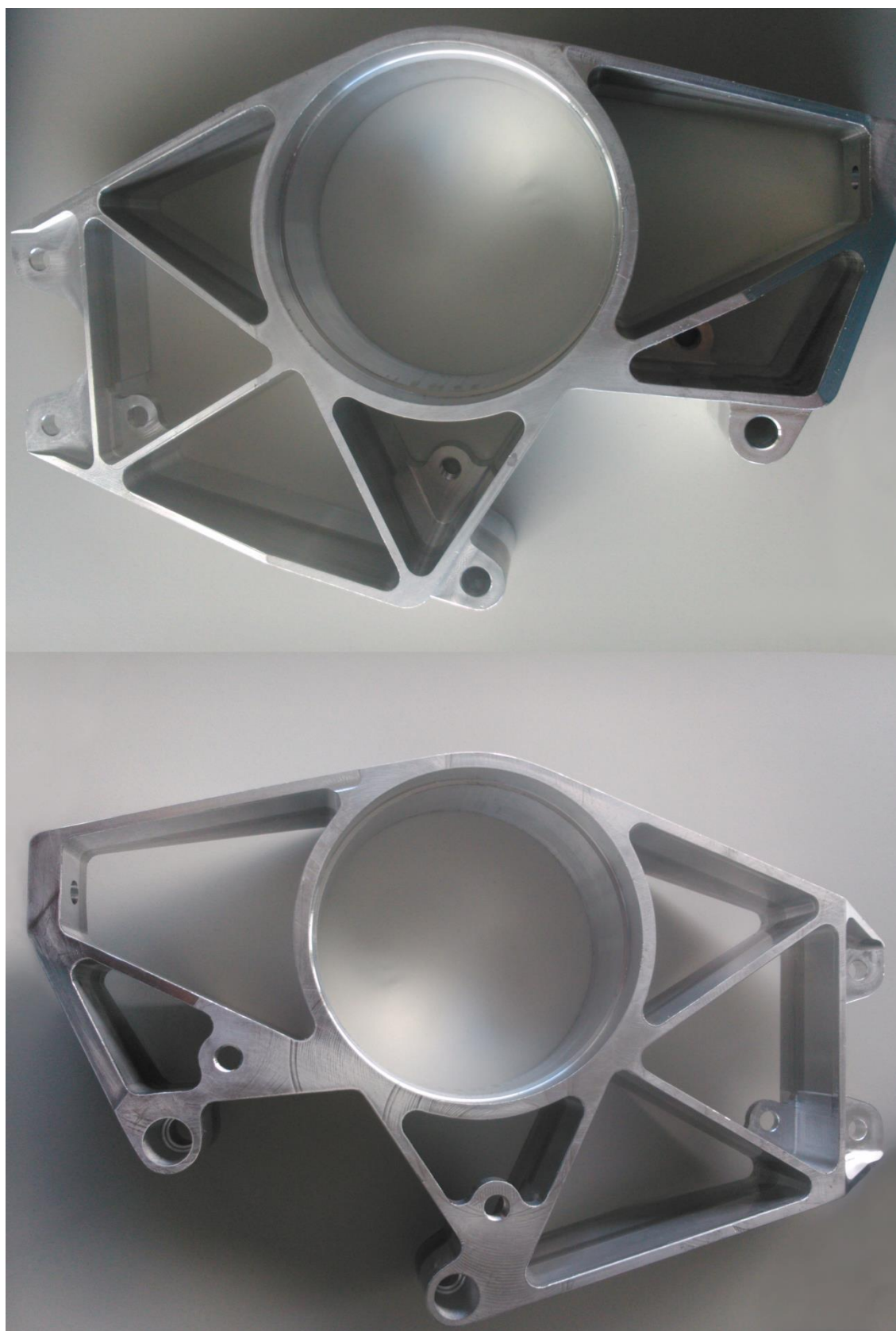


Obr. 79 Upnutá a připojená sonda TS 220 ve vřetenu CNC obráběcího centra MCV 754 QUICK.

Realizaci všech přípravných prací mohlo být přistoupeno k samotnému procesu obrábění. Při frézování této součásti bylo použito celkem 8 NC programů (3 pro hrubování první strany, 2 pro dokončování první strany, poté byla těhlice přepnuta o 180° podél osy X a pro druhou stranu byl aplikován 1 hrubovací a 2 dokončovací NC programy). Přepnutá těhlice byla uchycena pomocí upínek a ručním programováním byla odfrézována plocha, za kterou byla těhlice upnuta při frézování první strany. Obrábění otvoru pro uložení ložisek Ø 90 N7 bylo prováděno dílenským programováním a kontrola rozměrových tolerancí otvoru byla měřena pomocí třídotekového digitálního mikrometru s rozsahem 80 až 100 mm. Díra na pravé straně těhlice byla vyvrtána až po vyfrézování prototypu. Během procesu obrábění nenastaly žádné potíže. Upnutá těhlice po aplikaci prvních pěti frézovacích strategií před přepnutím z druhé strany je na obr. 80 a hotový prototyp na obr. 81.



Obr. 80 Těhlice po aplikaci prvních pěti frézovacích strategií.



Obr. 81 Hotový prototyp těhlice (pohled shora a zespod).

5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Cílem technicko-ekonomického zhodnocení je analýza výrobního času a výrobních nákladů souvisejících s výrobou prototypu těhlice předního pravého kola. Jelikož přední náprava má dvě kola, byl vyroben také druhý prototyp (těhlice levá), který je zrcadlově převrácen oproti těhlici pravé.

5.1 Porovnání a vyhodnocení strojních časů

V CAM programu PowerMILL byly vygenerovány jednotlivé strategie. Pro každou strategii byl zjištěn celkový čas obrábění, což je ten samý čas jako jednotkový čas CNC stroje t_{mA} . Jednotlivé časy t_{mA} pro všechny použité strategie jsou uvedeny v tab. 10. Takto vygenerované časy jsou však ovlivněny některými parametry, které se před prvotním vygenerováním nemusí uživatelem nastavovat. Převážně jde o nastavení propojení elementárních úseků jednotlivých drah u nájezdů a výjezdů, které jsou programem PowerMILL nastaveny automaticky na ochrannou výšku. V důsledku tohoto dochází ke zbytečnému prodloužení výrobního času, proto je důležité provést optimalizaci (viz tab. 11) vhodnou změnou propojení těchto elementárních drah v nastavení posuvů a rychlostí, čímž dojde k podstatnému snížení času výroby.

Tab. 10 Jednotkové časy chodu stroje t_{mA} pro jednotlivé strategie bez a s optimalizací.

| Frézovací strategie | Čas t_{mA} bez optimalizace | Čas t_{mA} s optimalizací |
|--|-------------------------------|-----------------------------|
| hrubování offsetem | 4h 13m 29s | 3h 52m 36s |
| hrubování offsetem (zbytkové obrábění) | 4h 9m 50s | 1h 7m 34s |
| hrubování offsetem (zbytkové obrábění) | 36m 20s | 21m 54s |
| konstant Z dokončení | 4h 15m 56s | 4h 14m 58s |
| 3D offset dokončení | 56m 40s | 53m 25s |
| hrubování offsetem | 1h 5m 55s | 1h 2m 41s |
| 3D offset dokončení | 9m 58s | 9m 53s |
| 3D offset dokončení | 18m 57s | 17m 45s |

Tab. 11 Porovnání celkových časů t_{mA} bez a s optimalizací propojení elementárních drah.

| Bez optimalizace | | Celkový čas t _{mA} | |
|------------------|----------------------|-----------------------------|----------|
| Krátké | <div>Ochrana</div> | 15h 47m 5s | (15,78h) |
| Dlouhý | <div>Ochrana</div> | | |
| Výchozí | <div>Ochrana</div> | | |
| S optimalizací | | Celkový čas t _{mA} | |
| Krátké | <div>Obloukem</div> | 12h 0m 46s | (12,02h) |
| Dlouhý | <div>Nejkratší</div> | | |
| Výchozí | <div>Ochrana</div> | | |

Dle tab. 11 je rozdíl časů bez a s optimalizací roven 3h 46m 41s (3,76h), čili optimalizace propojení elementárních drah vede k úspoře výrobního času o 23,83%. K tomuto času je třeba přičíst čas na výrobu dvou otvorů Ø 90N7 mm a vrtané díry Ø 6,1 mm 57m 15s (0,95h). Potom výsledný čas výroby prototypu je $t_{mA} = 12h 58m 1s$ (778 minut).

5.2 Vyhodnocení nákladů na výrobu prototypu těhlice

Výpočet nákladů na výrobu prototypu těhlice předního pravého kola studentské formule se odvíjí od hodinové sazby stroje a nákladů spojených s cenou polotovaru typu kvádrů o rozměrech 255 x 160 x 50 mm z materiálu CERTAL.

Cena polotovaru o daných rozměrech byla po konzultaci s obchodními zástupci společnosti ALFUN a.s. stanovena na částku $N_{Am} = 1028 \text{ Kč} \cdot \text{ks}^{-1}$ (jednotkové náklady na materiál). Jelikož byly vyráběny dvě těhlice, byla cena za dva polotovary $N_m = 2056 \text{ Kč}$ [48].

Součást těhlice byla vyráběna na CNC obráběcím centru MCV 754 QUICK ve školicím středisku společnosti BOSCH. Ta poskytuje týmu TU Brno Racing jakožto generální partner projektu studentské formule slevu ve výši 50% na výrobu součástek. Náklady na hodinu provozu CNC obráběcího centra byly stanoveny na $N_{hs} = 1300 \text{ Kč} \cdot \text{h}^{-1}$, jelikož jde o stroj ve školicím středisku. Po aplikaci 50% slevy klesly náklady na hodinu provozu CNC stroje na $N_{hs} = 650 \text{ Kč} \cdot \text{h}^{-1}$. Této ceně nemohly ostatní výrobní podniky konkurovat, tudíž je samozřejmostí, že výroba součástek byla zahájena u generálního sponzora, jakožto ekonomicky nejvýhodnější varianta. V opačném případě, pokud by součást byla vyráběna v externí firmě, byly by náklady na výrobu mnohonásobně vyšší, jelikož by hodinová sazba stroje byla určena podle skutečných nákladů spojených s výrobou [49].

Pro známou hodnotu nákladů na hodinu provozu stroje N_{hs} a jednotkového strojního času t_{mA} mohly být spočteny jednotkové náklady provozu CNC stroje N_{Aps} dle vztahu 1.25 [50].

$$N_{Aps} = \frac{N_{hs}}{60} \cdot t_{mA} \quad [\text{Kč} \cdot \text{ks}^{-1}], \quad (1.25)$$

kde: $N_{hs} [\text{Kč} \cdot \text{h}^{-1}]$ - náklady na hodinu provozu CNC stroje,
 $t_{mA} [\text{min}]$ - jednotkový čas CNC stroje.

Jednotkové náklady provozu stroje pro výrobu prototypu těhlice předního pravého kola spočtené dle vztahu 1.25 jsou uvedeny v tab. 12.

Tab. 12 Výpočet nákladů na provoz stroje pro výrobu jednoho prototypu těhlice.

| Stroj | Náklady na hodinu provozu stroje $N_{hs} [\text{Kč} \cdot \text{h}^{-1}]$ | Jednotkový čas CNC stroje $t_{mA} [\text{min}]$ | Jednotkové náklady provozu stroje $N_{Aps} [\text{Kč} \cdot \text{ks}^{-1}]$ |
|---------------|---|---|--|
| MCV 754 QUICK | 650 | 778 | 8 428 |

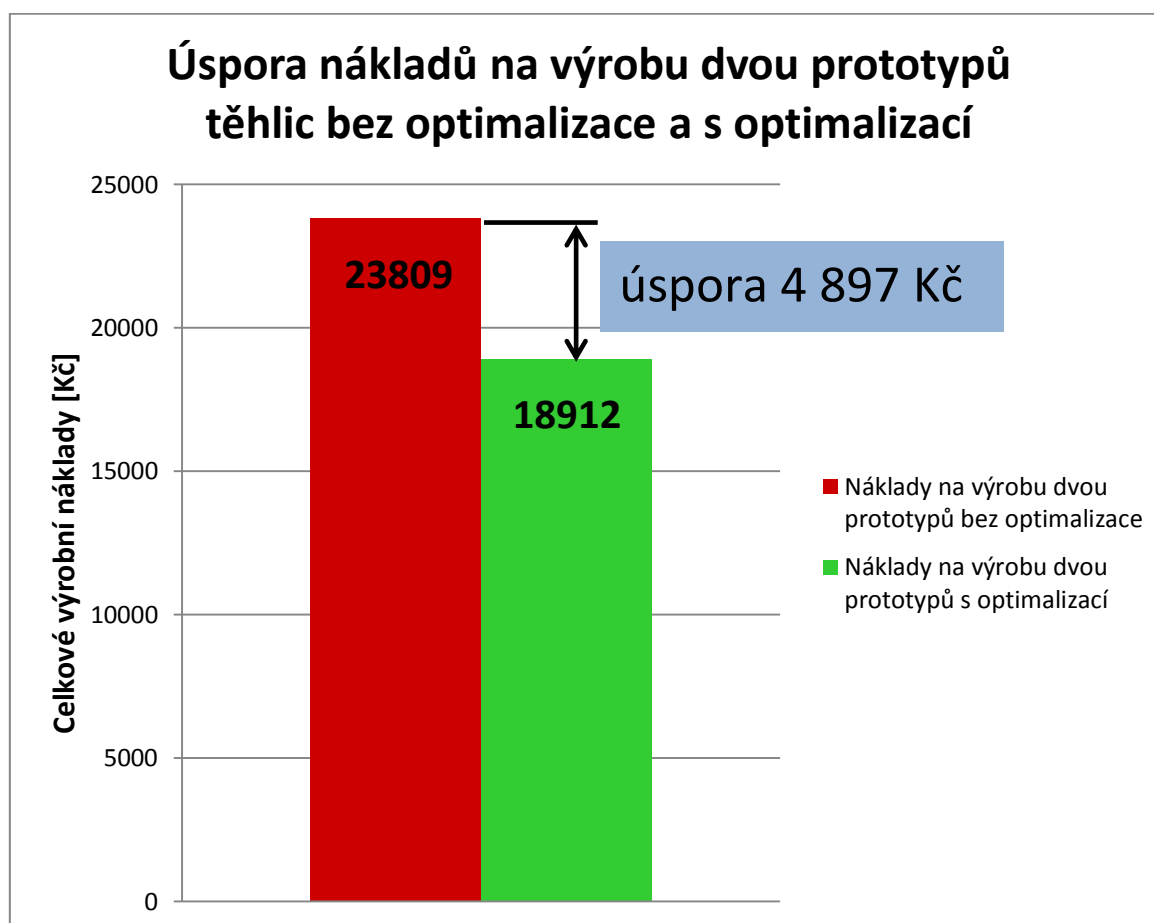
Celkové výrobní náklady N_c na výrobu těhlice předního pravého kola studentské formule zohledňující také výrobu těhlice předního levého kola ($n = 2 \text{ ks}$), náklady na materiál N_m a jednotkové náklady provozu CNC stroje N_{Aps} jsou vypočteny dle vztahu 1.26 [50].

$$N_c = n \cdot \left(\left(\sum_{i=1}^k N_{Apsi} \right) + N_{Am} \right) \quad [\text{Kč}], \quad (1.26)$$

kde: $n [\text{ks}]$ - počet vyrobených kusů,
 $N_{Apsi} [\text{Kč} \cdot \text{h}^{-1}]$ - jednotkové náklady provozu CNC stroje,
 $N_{Am} [\text{Kč} \cdot \text{ks}^{-1}]$ - jednotkové náklady na materiál.

Po přičtení nákladů na nákup jednoho polotovaru je získána celková cena výroby jednoho prototypu těhlice, která činí 9 456 Kč. Jelikož byly vyrobeny dva prototypy těhlice (pravá a levá), jsou celkové výrobní náklady na výrobu obou dvou prototypů rovny $N_c = 18\,912$ Kč.

V případě, že by nebyla provedena optimalizace propojení elementárních drah v programu PowerMILL, tudíž by čas t_{mA} byl místo 778 minut 1004 minut, byla by tato částka pro výrobu jednoho prototypu navýšena z 9 456 Kč na 11 905 Kč, pro oba prototypy by se částka vyšplhala z $N_c = 18\,912$ Kč na hodnotu $N_c = 23\,809$ Kč, což je navýšení výrobních nákladů o 25,9% oproti nákladům na výrobu při optimalizaci drah. Tímto byla týmu TU Brno Racing ušetřena částka 4 897 Kč při výrobě obou prototypů těhlic. Grafické znázornění úspory celkových výrobních nákladů je zobrazeno na obr. 82.



Obr. 82 Úspora celkových nákladů na výrobu dvou prototypů těhlic bez a s optimalizací.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a výrobou těhlice předního pravého kola studentské formule Dragon 4. Hlavními cíli práce byl návrh frézovacích strategií a jejich následný převod do NC programů, pomocí nichž byla realizována výroba funkčního prototypu součásti, který byl namontován do sestavy studentské formule Dragon 4.

Teoretická část práce se zabývá charakteristikou technologie frézování. Dále je proveden teoretický rozbor hliníkových slitin z hlediska jejich rozdělení do základních skupin, tepelného zpracování, jejich označování a problematiky jejich obrobitelnosti. Následuje teoretický rozbor obráběného materiálu použitého při výrobě těhlice s obchodním označením Certal.

Praktická část popisuje konstrukci těhlice v CAD programu SolidWorks 2012, poté následoval návrh frézovacích strategií v CAM programu PowerMILL 10 a jejich optimalizace, které byly aplikovány při výrobě fyzické součásti funkčního prototypu těhlice předního pravého kola, jehož výroba byla realizována ve firmě BOSCH DIESEL s.r.o. v Jihlavě.

Na závěr je provedeno technicko-ekonomické zhodnocení výroby.

Z dosažených výsledků diplomové práce vyplývá:

- Při konstruování těhlice byly hlavními požadavky co nejnížší hmotnost součásti a zároveň zachování její dostatečné tuhosti, což bylo ověřeno v softwaru ANSYS studentem a členem týmu TU Brno Racing Bc. Markem Fejfarem.
- Návrh frézovacích strategií byl prováděn s důrazem na co nejnížší dobu výroby, čehož bylo dosaženo optimalizací propojení elementárních drah v softwaru PowerMILL 10, čímž byly sníženy celkové výrobní náklady. Snížením celkových výrobních nákladů se dosáhlo úspory výrobního času o 23,83%, čímž byla získána úspora finančních prostředků týmu TU Brno Racing o částce 2 448,5 Kč za jeden prototyp těhlice. Při výrobě obou těhlic (levá i pravá) tato úspora vzrostla na 4 897 Kč.
- Podstatný vliv na úsporu výrobních nákladů týmu byl fakt, že výroba probíhala v prostorách generálního sponzora týmu, tudíž hodinová sazba stroje použitého při výrobě byla stanovena na minimum jako sponzorský dar, což mělo podstatný vliv na celkové výrobní náklady.
- Při výrobě součásti byly použity nástroje upnuté pomocí kleštinových upínačů. Výroba by mohla být zefektivněna použitím některého typu moderních nástrojových upínačů, čímž by mohly být navýšeny řezné podmínky, jelikož by mohlo být použito vyšších hloubek záběrů nástrojů, protože by upnutím do moderních upínačů snesl vyšší krouticí momenty.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] AB SANDVIK COROMANT. *Příručka obrábění: Kniha pro praktiky*. 1. české vyd. Překlad Miroslav Kudela. Praha: Scientia, c1997, 1 sv. (různé stránkování). ISBN 91-972-2994-6.
- [2] KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: CERM, 2005, 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
- [3] TU Brno Racing – Formule Student (SAE). TU Brno Racing [online]. © 2014 [vid. 2014-03-26]. Dostupné z: <http://www.tubnoracing.cz/cs/studentska-formule/>
- [4] TU Brno Racing – Formule Student (SAE). TU Brno Racing [online]. © 2014 [vid. 2014-03-26]. Dostupné z: <http://www.tubnoracing.cz/cs/tym/o-nas/>
- [5] Formula Student 2014 [online]. © 2014 [vid. 2014-03-26]. Dostupné z: <http://www.formulastudent.com/formula-student/formula-student-2014>
- [6] AB SANDVIK COROMANT. *Technická příručka obrábění*. C-2900:3CZE/01. Švédsko, 2005.10.
- [7] FOREJT, Milan. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [8] ANTON, Humár. *Technologie I – Technologie obrábění – 1. část: Studijní opory pro magisterskou formu studia* [online]. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003 [vid. 2014-04-27]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [9] SANDVIK COROMANT. *Sandvik Coromant: Znalosti a zkušenosti:Frézování:Jak postupovat:Hlavní zásady:Úhel nastavení* [online]. copyright 2000-2012 [vid. 2014-05-16]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/getting_started/general_guidelines/entering_angle/pages/default.aspx
- [10] SANDVIK COROMANT. *Sandvik Coromant: Znalosti a zkušenosti:Frézování:Jak postupovat:Hlavní zásady:Vibrace* [online]. copyright 2000-2012 [vid. 2014-05-17]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/getting_started/general_guidelines/vibration/pages/default.aspx
- [11] KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie výroby II: Studijní opory pro obor Strojírenská technologie* [online]. VUT v Brn2, Fakulta strojního inženýrství, 2002 [vid. 2014-05-17]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TechnVyroby_II.pdf
- [12] TUMLIKOVŮ. *Druhy fréz* [online]. Copyright © 2010, 2. 11. 2010 [vid. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/druhy-frez/>
- [13] PRAMET. *Katalog frézování 2014* [online]. Copyright 2014 [vid. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.pramet.com/cz/ke-stazeni.html>

- [14] ISCAR LTD. *Milling tools* [online]. © 2014 [vid. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.iscar.cz/products.aspx/countryId/1/productid/3531>
- [15] SANDVIK COROMANT. *Corokey 2010: Start:Downloads:Catalogues* [online]. © 2014 [vid. 2014-05-18]. Dostupné z: [http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/downloads/pages/search.aspx?q=catalogues&productfamilies=%5Ehydrogrip\\$&rootsite=%5Ehuhu\\$](http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/downloads/pages/search.aspx?q=catalogues&productfamilies=%5Ehydrogrip$&rootsite=%5Ehuhu$)
- [16] NAKOL S.R.O. *Fréza kotoučová: Kovoobráběcí nástroje:Frézy na kov:Frézy kotoučové na kov* [online]. © 2014 [vid. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.nakol.cz/freza-kotoucova-720275-polohrubozuba>
- [17] MT NÁSTROJE. *I-frezy.cz* [online]. © 2014 [vid. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.i-frezy.cz/>
- [18] SANDVIK COROMANT. *Frézování ozubení: Hlavní stránka:Znalosti a zkušenosti:Frézování:Přehled aplikací:Frézování ozubení* [online]. © 2014 [vid. 2014-05-19]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/application/overview/gear_milling/pages/default.aspx
- [19] HUMÁR, Anton. *Technologie I – Základní metody obrábění – I. část: Interaktivní multimediální text pro magisterskou formu studia* [online]. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2004 [vid. 2014-05-19]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-ave/zakl_met_obr/zakl_met_obr_1
- [20] TOS OLOMOUC. *Nástrojářská frézka se souvislým řízením: FNG 40 CNC A* [online]. © 2009 [vid. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.tos-olomouc.cz/oc-cz/vyrobn-program/numericky-rizene-konzolove-frezky/nastrojarska-frezka-se-souvislym-rizenim-fng-40-cnc-a/fotogalerie.html>
- [21] MIKRON MORAVIA S.R.O. *Stolová frézka – série B3K* [online]. © 2008 [vid. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.mikronmoravia.cz/obrabeci-stroje-pinnacle/frezky/frezky-stolove-b3k/stolova-frezka-serie-b3k.html>
- [22] STROJIMPORT A.S. *Frézky ložové a portálové* [online]. © 2014 [vid. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://www.strojimport.cz/frezky/lozove-a-portalove/>
- [23] HERMLE. *CNC centre MT series* [online]. © 2014 [vid. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://www.hermle.de/index.php?1560>
- [24] MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Jak se rozhodnout při volbě CNC obráběcího centra* [online]. 07.10.2002, © 2014 [vid. 2014-05-20]. Kód článku: 021037. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/jak-se-rozhodnout-pri-volbe-cnc-obrabeciho-centra.html>
- [25] BORO VAN, Petr. *Technický týdeník: Upínače nástrojů (2)* [online]. Praha: Technický Týdeník Business Media CZ, © 07.02.2012 [vid. 2014-05-20]. Dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/upinace-nastroju/upinace-nastroju-2_8498.html
- [26] TOOLHOLDING SYSTEMS. *SCHUNK GmbH & Co* [online]. © 2014 [vid. 2014-05-21]. Dostupné z: http://www.schunk.com/schunk_files/attachments/catalog_ToolholdingSystems_DE_EN.pdf

- [27] KUCHAR, Dušan. *MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. Druhá generace tepelných upínačů* [online]. 25.04.2007 [vid. 2014-05-21]. Kód článku: 070408. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/druha-generace-tepelných-upinacu.html>
- [28] SANDVIK COROMANT. *Coromant Capto: Tři systémy v jednom* [online]. © 2014 [vid. 2014-05-21]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/coromant_capto/pages/default.aspx
- [29] HUMÁR, Anton. ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE. *Výrobní technologie II: Sylaby předmětu pro bakalářské kombinované studium* [online]. VUT v Brně: Fakulta strojního inženýrství, 2002 [vid. 2014-05-21]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/VyrobníTechnologie_II.pdf
- [30] ROUČKA, Jaromír. ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE ODBOR SLÉVÁRENSTVÍ. *Odlévání neželezných kovů: Profesní vzdělávání pracovníků ve slévárenství II*. Brno, 2006.
- [31] PTÁČEK, Luděk a kolektiv. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [32] DORAZIL, Eduard. *Nauka o materiálu I: Přednášky: určeno pro posluchače Fakulty strojního inženýrství*. 3. vyd. Brno VUT: Učební texty vysokých škol, 1989. ISBN 80-214-1028-0.
- [33] PERIODICKÁ TABULKA PRVKŮ. *Hliník: Periodická tabulka: Kovy: Hliník* [online]. © 2009 – 2013 [vid. 2014-05-21]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/13.html>
- [34] JULIŠ, Martin. ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ. *Neželezné kovy a slitiny neželezných kovů: Prezentace do cvičení z předmětu strojírenské materiály a tepelné zpracování*. 2012.
- [35] GLEICH ALUMINIUM. *CERTAL* ® [online]. GLEICH Gruppe, Kaltenkirchen, Germany, © 2012 [vid. 2014-05-22]. Dostupné z: <http://gleich.de/cz/produkty/vlcovan-desky/vlcovan-desky-na-vrobu-forem/certal#data>
- [36] GLEICH ALUMINIUM. *CERTAL* ®: *Technický list* [online]. © GLEICH Aluminium s.r.o, 15.7.2013 [vid. 2014-05-22]. Dostupné z: <http://gleich.de/cz/produkty/vlcovan-desky/vlcovan-desky-na-vrobu-forem/certal?pdf>
- [37] ALMET Belgium. *CERTAL – Technical data sheet* [online]. 2012 [vid. 2014-05-22]. Dostupné z: <http://www.almet-belgium.be/web/media/DATASHEETS/CERTAL.pdf>
- [38] SANDVIK COROMANT. *Frézování hliníku: Hlavní stránka: Znalosti a Zkušenosti: Frézování: Jak postupovat: Frézování různých materiálů: Frézování hliníku* [online]. © 2014 [vid. 2014-05-22]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/getting_started/milling_different_materials/aluminium_milling/pages/default.aspx

- [39] SANDVIK COROMANT. *ISO N Neželezné materiály: Hlavní stránka: Znalosti a zkušenosti: Materiály: Obráběné materiály: ISO N Neželezné materiály* [online]. © 2014 [vid. 2014-05-22]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_n_non_ferrous_materials/pages/default.aspx
- [40] MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Nástroje pro obrábění hliníkových slitin s mikroleštěným povrchem* [online]. 17.04.2002 [vid. 2014-05-22]. Kód článku: 020461. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-obrabeni-hlinikovych-slitin-s-mikrolestenym-povrchem.html>
- [41] GENERAL WELD. *Číselné označování hliníku a jeho slitin dle ČSN EN 573-1:2005 (42 1401): Informace: Normy* [online]. © General weld s.r.o. 2008 [vid. 2014-05-23]. Dostupné z: <http://www.generalweld.cz/cz/standards.php?id=7>
- [42] TU Brno Racing. *Interní materiály a podklady týmu*. Brno, 2013.
- [43] DELCAM. *PowerMILL - cad cam pro 2D, 3D a 5D frézování* [online]. © Delcam Česká republika 2008 - 2014 [vid. 2014-05-26]. Dostupné z: <http://www.delcam.cz/produkty/powermill/>
- [44] ŠIMONEK, Pavel, Michal JELÍNEK a Aleš POLZER. *Aplikace CAD/CAM v technologii: vzdělávací a tréninkový modul*. Vysoké učení technické v Brně - Fakulta strojního inženýrství. Brno, 2012, 343 s.
- [45] BOSCH. *O společnosti Bosch v České republice* [online]. © 2014 Robert Bosch [vid. 2014-05-27]. Dostupné z: http://www.bosch.cz/cs/cz/about_bosch_home_7/about-bosch-in-czech-republic.php
- [46] KOVOSVIT MAS. *MCV 754 QUICK* [online]. © 2013 KOVOSVIT MAS, a. s. [vid. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.kovosvit.cz/upload/products/pdf/mcv-754-quick-1384869927.pdf>
- [47] ZOELLER. *Měření a kontrola nástrojů* [online]. © 1987 - 2014 Zoller Austria GmbH [vid. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://www.zoller.cz/produkty/mereni-a-kontrola-nastroju/>
- [48] ALFUN A.S. *Vaše dotazy* [online]. ALFUN a.s. © Copyright 2014 [vid. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.alfun.cz/>
- [49] BOSCH DIESEL s.r.o. *Interní materiály a podklady firmy*. Jihlava, 2014.
- [50] PROKOP, Jaroslav. *Přednášky z předmětu HTR Vybrané statě z obrábění*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| Zkratka | Popis |
|-------------|---|
| CAD | Computer aided design / Počítačem podporované navrhování (design) |
| CAM | Computer aided manufacturing / Počítačem podporovaná výroba |
| CBN | Cubic boron nitride / Kubický nitrid bóru |
| CNC | Computer numerical control / Počítačově číslicově řízené |
| ČSN | Česká technická norma |
| DLC | Diamond like carbon / diamantu podobné uhlíkové vrstvy |
| FCC | Face centered cubic / Kubická plošně centrovaná krystalická mřížka |
| FSI | Fakulta strojního inženýrství / Faculty of mechanical engineering |
| HB | Tvrdost dle Brinella |
| HSC | High speed cutting / vysokorychlostní obrábění |
| HSS | High speed steel / Rychlořezná ocel |
| NC | Numerical control / Číslicově řízené |
| PCD | Polycrystalline diamond / Polykrystalický diamant |
| PCBN | Polycrystalline cubic boron nitride / Polykrystalický kubický nitrid bóru |
| SK | Slinutý karbid |
| TU | Technical university / Technická univerzita |
| VBD | Vyměnitelná břitová destička |
| USB | Universal Serial Bus / Univerzální sériová sběrnice |
| VUT | Vysoké učení technické |
| WC | Wolframkarbid (karbid wolframu) |
| | |

| Symbol | Jednotka | Popis |
|-----------------------|--------------------|-------------------------|
| A₅₀ | [%] | tažnost |
| A_{Di} | [mm ²] | jmenovitý průřez třísky |
| a_e | [mm] | šířka řezu |
| a_p | [mm] | hloubka řezu |
| B | [mm] | šířka frézované plochy |

| | | |
|--------------------------------------|------------------------|---|
| b_{Di} | [mm] | jmenovitá šířka třísky |
| c_{Fc} | [-] | konstanta vlivu obráběného materiálu |
| D | [mm] | průměr frézy |
| D_c | [mm] | průměr frézy (taktéž průměr řezu) |
| D_{c2}, D₃ | [mm] | největší průměr frézy |
| D_e | [mm] | efektivní průměr |
| e | [mm] | radiální vzdálenost mezi osou obrobku a frézy |
| E | [GPa] | modul pružnosti v tahu |
| F_c, F_i | [N] | celková řezná síla |
| F_{ci} | [N] | řezná síla |
| F_{cNi} | [N] | kolmá řezná síla |
| F_{fi} | [N] | posuvová síla |
| F_{fNi} | [N] | kolmá posuvová síla |
| G | [m/Ω.mm ²] | elektrická vodivost |
| H | [mm] | hloubka odebírané vrstvy |
| h_{Di} | [mm] | jmenovitá tloušťka třísky |
| h_{ex} | [mm] | maximální tloušťka třísky |
| h_m | [mm] | průměrná tloušťka třísky |
| f_n | [mm] | posuv na otáčku |
| f_z | [mm] | posuv na zub pro zvolenou frézu a geometrii |
| k_c | [N/mm ²] | měrná řezná síla |
| l | [mm] | délka obráběné plochy |
| l_n | [mm] | délka nájezdu |
| l_{nf} | [mm] | délka nájezdu frézy |
| l_p | [mm] | délka přejezdu |
| l_{pf} | [mm] | délka přejezdu frézy |
| L | [mm] | dráha nástroje ve směru posuvového pohybu |
| n | [min ⁻¹] | otáčky vřetene |
| n | [ks] | počet vyrobených kusů |
| N_{Am} | [Kč.ks ⁻¹] | jednotkové náklady na materiál |

| | | |
|-----------------|---------------------------------------|--|
| | | |
| N_{Aps} | [Kč.ks ⁻¹] | jednotkové náklady provozu CNC stroje |
| N_c | [Kč] | celkové výrobní náklady |
| N_{hs} | [Kč.h ⁻¹] | náklady na hodinu provozu CNC stroje |
| N_m | [Kč] | náklady na materiál |
| n_z | [-] | počet zubů v současném záběru |
| P_c | [W] | řezný výkon |
| P_m | [W] | výkon elektromotoru obráběcího stroje |
| R_m | [Mpa] | mez pevnosti v tahu |
| $R_{p0,2}$ | [MPa] | smluvní mez kluzu |
| t_{as} | [min] | jednotkový čas strojní |
| t_{mA} | [min] | jednotkový čas CNC stroje |
| v_c | [m.min ⁻¹] | řezná rychlost |
| v_f | [mm.min ⁻¹] | posuvová rychlost (posuv stolu) |
| x | [-] | exponent vlivu tloušťky třísky |
| z | [-] | počet zubů (VBD) frézy |
| z_n | [ks] | celkový počet břitů (zubů, VBD) na fréze |
| α | [10 ⁻⁶ .K ⁻¹] | lineární koeficient tepelné roztažnosti |
| α | [hm. %] | tuhý roztok α |
| β | [hm. %] | fáze β složená z krystalů téměř čistého Si |
| η_m | [-] | mechanická účinnost obráběcího stroje |
| κ_r | [°] | úhel nastavení hlavního ostří |
| λ | [W.m ⁻¹ .K ⁻¹] | tepelná vodivost |
| ρ | [g.cm ⁻³] | hustota |
| φ_i | [°] | úhel posuvového pohybu |
| φ_{max} | [°] | maximální úhel posuvového pohybu |
| ψ | [°] | úhel záběru čelní frézy |

SEZNAM PŘÍLOH

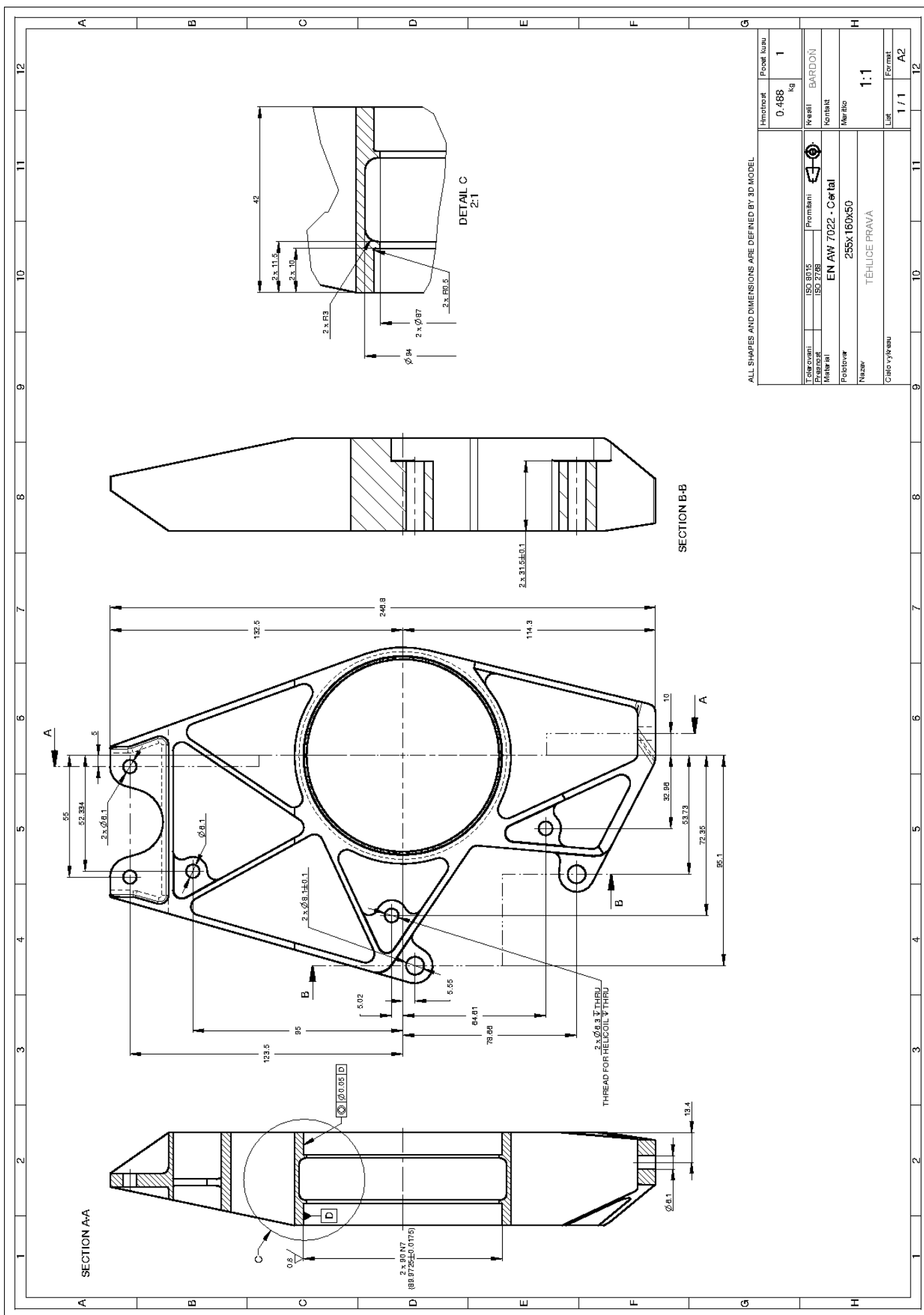
Příloha 1 Výkres součásti TĚHLICE PRAVÁ

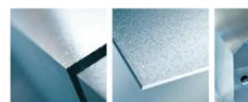
Příloha 2 Technický list slitiny hliníku s obchodním označením CERTAL®

Příloha 3 Výrobní technologický postup pro součást TĚHLICE PRAVÁ

Příloha 4 Ukázka NC programu a kódu

PŘÍLOHA 1





CERTAL®

| Znaky slitiny | |
|----------------|--|
| Slitina | EN AW 7022 [AlZn5Mg3Cu], speciální typ |
| Typ slitiny | vytvrditelná |
| Povrch | T651, uvolněný |
| Stav materiálu | válcovaný povrch |

| Mechanické vlastnosti ¹⁾ | | typické hodnoty |
|-------------------------------------|------------|-----------------|
| Mez kluzu $R_{p0,2}$ | [MPa] | 400 – 495 |
| Pevnost v tahu R_m | [MPa] | 490 – 555 |
| Tažnost A_{50} | [%] | 6 – 9 |
| Tvrdost HBW | [2,5/62,5] | 165 – 170 |

| Fyzikální vlastnosti ¹⁾ | | typické hodnoty |
|------------------------------------|---------------------------------------|-----------------|
| Objemová hmotnost | [g/cm ³] | 2,76 |
| Modul pružnosti | [GPa] | 72 |
| Elektrická vodivost | [m/Ω · mm ²] | 18 – 22 |
| Koeficient tepelné roztažnosti | [K ⁻¹ · 10 ⁻⁶] | 23,6 |
| Tepelná vodivost | [W/m · K] | 120 – 150 |
| Specifická tepelná kapacita | [J/kg · K] | 862 |

| Technologické vlastnosti ²⁾ | |
|---|-------------------|
| Tvarová stálost/Vnitřní pnutí | 2 – 3 |
| Obrobitelnost | 1 |
| Vhodnost k erozivnímu obrábění | 1 |
| Svařitelnost (plyn / WIG / MIG / Odporové / EB) | 6 / 5 / 5 / 2 / 3 |
| Odolnost proti korozi (mořská voda / povětří / SpRK) | 5 / 5 / 3 |
| Použití při vysokých teplotách (max. °C při dlouhodobém/krátkodobém zatížení) ³⁾ | 90 / 120 |
| Eloxování (technické / dekorativní / tvrdé) ⁴⁾ | 3 / 6 / 2 |
| Leštitelnost | 1 |
| Vhodnost k leptání struktur | 1 – 2 |
| Kontakt s potravinami (podle EN 602) | ne |

| Tolerance | | | |
|-------------------|------------------------------|---------------|--------------------|
| Při tloušťce [mm] | Rovinnost [mm] ⁵⁾ | Tloušťka [mm] | Délka & Šířka [mm] |
| 8 – 140 | gem. EN 485-3 | gem. EN 485-3 | EN 485-3 |
| Zuschnitte | | | DIN ISO 2768-1m |

| Dodávané formáty | | |
|--------------------------------|---|----------------------------|
| Formáty [mm] | 1.520 × 3.020 | u tloušťek od 8 – 100 mm |
| | 1.400 × 3.020 | u tloušťek od 110 mm |
| | 1.200 × 3.020 | u tloušťek od 120 – 130 mm |
| | 950 × 3.020 | u tloušťek od 140 mm |
| Tloušťky na skladě | 8, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 | |
| | 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140 | |
| Další tloušťky podle poptávky! | | |

Datum: 15.07.2013

- 1) Typické hodnoty při pokojové teplotě.
- 2) Relativní hodnoty hliníkových materiálů od 1 (velmi dobrý) do 6 (nevhodný).
- 3) Bez ztráty pevnosti po ochlazení.
- 4) Vylučně technická anodizace. Neposkytujeme žádnou záruku na barevný vzhled/řešení.
- 5) Tolerance rovinnosti se měří výlučně na měřících stolech a s použitím ocelového pravítka.

CERTAL® je registrovaná obchodní značka firmy CONSTELLIUM Valais SA

PŘÍLOHA 3

| VÝROBNÍ POSTUP | | | TĚHLICE PRAVÁ | | Číslo výkresu | | D4S-2101 | | | | | |
|------------------|---------------------------------------|---|---|---------------------------|------------------|----------------------------|------------|--|-----------------|-----------------|---|--|
| VUT FSI ÚST BRNO | | Dne: 28.5.2014 | | Výhotovili: Bardoň Václav | | Polotovary: 255 x 160 x 50 | | Materiál polotovaru: CERTAL EN-AW 7022 | | Číslo listu:1/1 | | |
| Číslo op. / ús. | Název, označení stroje | Popis práce v operaci | Výrobní nástroje, přípravky, měřidla, pomůcky | Poz. v nástř. hlavě | Výrobní podmínky | | | | | | | |
| | | | | | v_c [m/min] | n [min ⁻¹] | f_z [mm] | a_p [mm] | t_{m44} [min] | | | |
| 1/1 | CNC obráběcí centrum MCV 754 QUICK | Upnout do svěráku za délku 160 mm | | | - | - | - | - | - | - | - | |
| 1/2 | | Frézovat čelní plochu nahrubo na rozměr 46 mm | čelní válcová fréza stopková Ø 18 mm FRANKEN | | 189 | 3000 | 0,04 | 4 | 8,4 | | | |
| 1/3 | | Frézovat nahrubo otvor Ø 90 mm a konturu vnější i vnitřní (p = 0,1 mm) | čelní válcová fréza stopková Ø 18 mm FRANKEN | | 189 | 3000 | 0,04 | 3 | 233 | | | |
| 1/4 | | Frézovat nahrubo - zbytkové obrábění 2x díru Ø 6,3 mm, 2x díru Ø 8,1 mm a kontury vnější i vnitřní (p = 0,1 mm) | čelní válcová fréza stopková Ø 6 mm FRANKEN | | 144 | 7500 | 0,03 | 1,5 | 68 | | | |
| 1/5 | | Frézovat nahrubo - zbytkové obrábění zešikmení a 3x díru Ø 6,1 mm (p = 0,1 mm) | čelní válcová fréza stopková Ø 4 mm FRANKEN | | 65 | 5000 | 0,015 | 1 | 22 | | | |
| 1/6 | | Upnout dotykovou sondou a středovým snímáním vystředit střed otvoru | dotyková sonda TS 220 | | - | - | - | - | 3 | | | |
| 1/7 | | Frézovat načisto - dlenským programováním díru Ø 90 mm na díru Ø 90N7 do hloubky 10 mm | čelní válcová fréza stopková Ø 18 mm FRANKEN | | 113 | 2000 | - | - | 20 | | | |
| 1/8 | | Zkontrolovat rozměry | třídotekový mikrometr, hloubkoměr, posuvné měřítko (vše digitální) | | - | - | - | - | - | | | |
| 1/9 | | Frézovat načisto 2x díru 8,1 mm a konturu vnější i vnitřní | kulová fréza stopková Ø 6 mm FRANKEN | | 143 | 7500 | 0,03 | 0,3 | 255 | | | |
| 1/10 | | Frézovat načisto zešikmení, 3x díru Ø 6,1 mm a 2x díru Ø 6,3 mm | rádiusová fréza Ø 6 mm FRANKEN | | 143 | 7500 | 0,03 | - | 53 | | | |
| 1/11 | | Ručně odstranit ostřiny a zkontrolovat rozměry | ruční odlehlovač, mikrometr, hloubkoměr, posuvné měřítko (vše digitální) | | - | - | - | - | - | | | |
| 1/12 | | Otočit polotovary o 180° kolem osy X a upnout pomocí upínek | | | - | - | - | - | - | | | |
| 1/13 | | Frézovat čelní plochu o 4 mm na rozměr 42 mm | čelní válcová fréza stopková Ø 18 mm FRANKEN | | 189 | 3000 | 0,04 | 4 | 8,4 | | | |
| 1/14 | | Frézovat nahrubo zkosení, zešikmení, kapsu a 2x díru Ø 8,1 mm | rádiusová fréza Ø 6 mm FRANKEN | | 143 | 7500 | 0,01 | 1,5 | 63 | | | |
| 1/15 | | Frézovat načisto zešikmení | rádiusová fréza Ø 6 mm FRANKEN | | 143 | 7500 | 0,01 | - | 10 | | | |
| 1/16 | | Frézovat načisto zkosení | rádiusová fréza Ø 6 mm FRANKEN | | 143 | 7500 | 0,01 | - | 18 | | | |
| 1/17 | | Upnout dotykovou sondou a středovým snímáním vystředit střed otvoru | dotyková sonda TS 220 | | - | - | - | - | 3 | | | |
| 1/18 | | Frézovat načisto - dlenským programováním díru Ø 90 mm na díru Ø 90N7 do hloubky 10 mm | čelní válcová fréza stopková Ø 18 mm FRANKEN | | 113 | 2000 | - | - | 20 | | | |
| 1/19 | | Ručně odstranit ostřiny a zkontrolovat rozměry | třídotekový mikrometr, ruční odlehlovač, mikrometr, hloubkoměr, posuvné měřítko (vše digitální) | | - | - | - | - | - | | | |
| 1/20 | | Vrtat díru Ø 6,1 mm skrz | šroubovít vrták Ø 6,1 mm GARANT | | 50 | 1895 | 0,2 | - | 0,25 | | | |

PŘÍLOHA 4

61 L X137.006 Y67.532
 62 L X139.487 Y67.915
 63 L X141.380 Y68.360
 64 L X145.165 Y69.535
 65 L X149.111 Y71.317
 66 L X150.843 Y72.281
 67 L X152.300 Y73.210
 68 L X154.628 Y74.877
 69 L X156.520 Y76.457
 70 L X158.983 Y78.887
 71 L X160.563 Y80.780
 72 L X161.960 Y82.673
 73 L X163.210 Y84.565
 74 L X164.265 Y86.458
 75 L X165.983 Y90.232
 76 L X167.192 Y94.028
 77 L X167.637 Y95.921
 78 L X168.210 Y99.706
 79 L X168.367 Y103.491
 80 L X168.280 Y105.384
 81 L X167.847 Y109.169
 82 L X166.990 Y112.954
 83 L X165.983 Y115.996
 84 L X164.827 Y118.632
 85 L X162.717 Y122.417
 86 L X161.420 Y124.310
 87 L X160.306 Y125.724
 88 L X158.413 Y127.879
 89 L X156.520 Y129.746
 90 L X153.907 Y131.880
 91 L X151.095 Y133.773
 92 L X148.950 Y134.967
 93 L X145.165 Y136.658
 94 L X142.476 Y137.558
 95 L X139.487 Y138.279
 96 L X135.702 Y138.826
 97 L X131.917 Y138.956
 98 L X130.024 Y138.868
 99 L X126.239 Y138.418
 100 L X122.524 Y137.558
 101 L X118.669 Y136.176
 102 L X116.776 Y135.340
 103 L X113.905 Y133.773
 104 L X111.098 Y131.888
 105 L X108.771 Y129.988
 106 L X107.313 Y128.605
 107 L X105.420 Y126.599
 108 L X103.580 Y124.310
 109 L X102.283 Y122.417
 110 L X100.173 Y118.632
 111 L X99.338 Y116.739
 112 L X97.997 Y112.954
 113 L X97.153 Y109.169
 114 L X96.889 Y107.276
 115 L X96.633 Y103.491
 116 L X96.789 Y99.706
 117 L X97.363 Y95.921
 118 L X97.850 Y93.849
 119 L X99.009 Y90.243
 120 L X100.735 Y86.458
 121 L X101.790 Y84.565
 122 L X102.849 Y82.978
 123 CC X108.218 Y86.561
 124 C X111.876 Y81.242 DR+
 125 CC X108.167 Y86.636
 126 C X113.612 Y90.270 DR+
 127 L X112.892 Y91.348
 128 L X112.346 Y92.328
 129 L X111.152 Y94.945
 130 L X110.386 Y97.331
 131 L X110.138 Y98.386
 132 L X109.749 Y100.952

NC Program1_TPPS_valcova freza_18,01

Jméno: 1_TPPS_valcova freza_18,01

Výstupní soubor: D:\D_O_K_T_O_R_S_K_É S_T_U_D_I_U_M\Pavel Ramik - obrábí

Typ stroje: C:\dcam\config\ductpost\02Heid530_OSO frezka.opt

Výstup pracovní roviny: Jméno úlohy: 1

Číslo programu: Hodnota nástroje: Konec

Automatické přiřazení nástroje: Zapni Spojující pohyby: Simultánní

| Dráha | Číslo | Průměr | Rádus břitu | íestav | Přesah | ID nástroje | Typ | Tolerance |
|-------|-------|--------|-------------|--------|--------|---------------|------------|-----------|
| 1 | 1 | 18,01 | | 100 | | Celni valc... | Rovné č... | 0,1 |

Obnovit Výměna nástroje: Po novém nástroji Číslování nástroje: Jak je zadaná

Pozice výměny nástroje: Před spojením

Dráha 1

Nástroj

ID: Celni valc Číslo nástroje: 1 Délka sestavy: 100,0

Korekce

Délka: Vypni Rádus: Ne

Výstup vrtacího cyklu: Zapni Chlazení: Standardní

Výstupní soubor:

Zapsat Aplikovat Akceptovat Uzavřít